

新疆近40年春小麦品种光合 生理遗传多样性分析

张景灿^{1,3}, 徐其江^{2,3}, 张永强^{2,3}, 曾潮武², 毕海燕⁴, 雷钧杰^{2,3},
陈传信^{2,3}, 聂石辉^{2,3}, 徐文修¹, 李杰^{1,3}, 陈慧^{1,3}

(1. 新疆农业大学农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院粮食作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091;
3. 农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830091;
4. 新疆维吾尔自治区农村能源工作站, 新疆 乌鲁木齐, 830001)

摘要:以1985—2024年审定的65份不同年代春小麦品种为研究对象,分析其灌浆期干物质分配占比,对小麦主要光合生理指标进行遗传变异、相关性、聚类及主成分分析,并开展综合评价。结果表明,不同品种间农艺性状具有丰富的遗传多样性,65份小麦材料多样性指数介于1.81~2.03之间,其中 C_i (胞间 CO_2 浓度)最大,为2.03,最大光合效率比率(F_o/F_m)最小,为1.81。主成分分析将8个性状转化为3个主成分,累计贡献率达73.429%,其中, F_v/F_m 对产量影响最大,贡献值达0.923。随着审定年份的推进,叶片和穗的干物质占比呈上升趋势,茎秆的干物质占比呈下降趋势,产量呈上升趋势,各品种产量介于4 443.3~8 582.4 kg·hm⁻²之间。结合3个主成分因子的贡献率权重和不同年代小麦品种产量表现,筛选出‘新春41号’、‘新春31号’、‘新春47号’、‘新春40号’、‘新春46号’、‘粮春1354’、‘新春37号’、‘新春30号’、‘粮春1758’和‘新春34号’10个品种,其中‘新春47号’的产量最高(8 143.20 kg·hm⁻²),可作为高光效品种在新疆地区进行育种利用和推广种植。

关键词:春小麦品种;光合生理;遗传多样性;干物质积累;产量;新疆

中图分类号:S512.1⁺2;S32 **文献标志码:**A

Analysis of photosynthetic physiology and genetic diversity in spring wheat varieties from Xinjiang over the past 40 years

ZHANG Jingcan^{1,3}, XU Qijiang^{2,3}, ZHANG Yongqiang^{2,3}, ZENG Chaowu², BI Haiyan⁴, LEI Junjie^{2,3},
CHEN Chuanxin^{2,3}, NIE Shihui^{2,3}, XU Wenxiu¹, LI Jie^{1,3}, CHEN hui^{1,3}

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;
2. Research Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi, Xinjiang 830091, China;
3. Key Laboratory of Desert - Oasis Crop Physiology, Ecology and Cultivation, MOARA, Urumqi, Xinjiang 830091, China;
4. Rural Energy Workstation in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830001, China)

Abstract: Using 65 spring wheat varieties of different ages approved from 1985 to 2024 as materials, the proportion of dry matter allocation during the grain filling stage was analyzed. Genetic variation, correlation, clustering, and principal component analysis were performed on the main photosynthetic physiological indicators of wheat, and a comprehensive evaluation was conducted. The results showed that there was rich genetic diversity in agronomic traits among different varieties. The diversity index of 65 wheat materials ranged from 1.81 to 2.03, with the highest intercellular CO_2 concentration at 2.03 and the lowest F_o/F_m at 1.81. The principal component analysis

收稿日期:2024-07-31

修回日期:2024-11-13

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2021B02002-1, 2022B02001-3);新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划项目(2023TSYCCX0013, 2023TSYCLJ0009);新疆维吾尔自治区“三农”骨干人才培养项目(2022SNGGNT062);国家小麦产业技术体系乌鲁木齐综合试验站项目(CARS-03-94);新疆维吾尔自治区小麦产业技术体系项目(XJARS-01);国家自然科学基金(31960379, 51879267)

作者简介:张景灿(2001-),男,福建晋江人,硕士研究生,研究方向为小麦高产栽培与抗逆调控。E-mail:myjc0120@163.com

通信作者:张永强(1988-),男,河南平舆人,副研究员,硕士生导师,主要从事小麦高产栽培生理与抗逆调控研究。E-mail:zyq988@yeah.net.

徐文修(1962-),女,河北蠡县人,教授,博士生导师,主要从事农作制度与农业生态研究。E-mail:xjwxw@sina.com

transformed the eight traits into three principal components, with a cumulative contribution rate of 73.429%. Among them, F_v/F_m had the greatest impact on yield, with a contribution value of 0.923. With the advancement of the approval year, the proportion of dry matter in leaves and ears showed an upward trend, while the proportion of dry matter in stems showed a downward trend. The yield showed an upward trend with the advancement of the approval year, and the yield varied between 4 443.3~8 582.4 kg · hm⁻² among different varieties. Based on the contribution rate weights of the three principal component factors and the yield performance of wheat varieties from different years, the following 10 varieties were selected: ‘Xinchun 41’, ‘Xinchun 31’, ‘Xinchun 47’, ‘Xinchun 40’, ‘Xinchun 46’, ‘Liangchun 1354’, ‘Xinchun 37’, ‘Xinchun 30’, ‘Liangchun 1758’, and ‘Xinchun 34’. Among them, ‘Xinchun 47’ had the highest yield (8 143.20 kg · hm⁻²) and can be used as a high photosynthetic efficiency variety for breeding, utilization and promotion in Xinjiang region.

Keywords: spring wheat variety; photosynthetic physiology; genetic diversity; dry matter accumulation; yield; Xinjiang

新疆是我国小麦主产区之一,其小麦种植面积和产量分别占全国小麦的 4.91%和 4.75%^[1]。光合作用为小麦产量形成贡献了 90%以上的物质^[2],其贡献率与作物光合能力密切相关^[3]。因此,分析新疆近 40 年春小麦品种光合生理及其干物质占比演变规律对新疆春小麦育种工作至关重要。

不同小麦品种的株型、光合能力和空间结构各异,株型和叶型的改变势必会影响叶片对光能的截获,进而影响其光合作用^[4]。小麦籽粒产量是花前和花后光合产物共同作用的结果^[5]。良好的群体结构可以提高冠层光能截获率,促进光合产物向作物籽粒的转运^[6]。小叶直立叶型小麦通过提高净光合速率和延缓旗叶衰退而提高光合生产力,大叶披垂叶型小麦则通过增加光合面积和提高灌浆速率来增加穗重^[7]。气孔大小对植物的光合作用有重要影响^[8]。有研究指出,小麦旗叶面积与气孔长度、宽度和面积呈显著或极显著正相关关系^[9]。随着光合作用的深入研究,利用叶绿素荧光动力学方法可以快速、无损地研究不同品种光合生理的差异^[10]。 F_v/F_m 、 F_o/F_m 、 PI_{abs} 分别代表 PS II 的原初光能转换效率、热耗散的量子比率、光合性能指数。方辉等^[11]研究表明,减施氮肥处理会降低不同小麦品种的光合参数和叶绿素荧光参数。坚天才等^[12]研究也发现,合理的施氮量能够提高植物对光能的捕获、吸收、转化及最大光化学效率。唐晓培等^[13]研究表明,在非充分灌溉条件下,产量较高的小麦品种拥有更高的实际光合效率($\Phi PS II$)和光合活性(qP)。前人针对小麦光合特性已开展不少研究,但多集中在不同灌溉和施肥条件下进行分析,关于不同年代品种间光合特性的比较则鲜有报道。

当前对于小麦种质资源鉴定评价主要围绕农

艺性状、产量、品质和抗逆性等方面展开,对不同种质间光合效率差异的评价较少。因此,本试验以新疆近 40 年共 65 个不同春小麦品种为材料,研究其光合生理指标及干物质占比,同时运用相关分析、聚类分析及主成分分析对不同小麦种质进行综合评价,明确不同年代春小麦品种光合特性及干物质积累演变规律,以期新疆春小麦育种及高光效种质筛选利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为新疆近 40 年审定的 65 个春小麦品种(表 1),其中审定年代为 1980S、1990S、2000S、2010S 和 2020S 的材料分别有 2、6、24、27 份和 6 份,所有材料均由新疆农业科学院粮食作物研究所春小麦遗传育种创新团队提供。

1.2 试验设计

试验于 2022—2023 年连续 2 个春小麦生长季在新疆农业科学院奇台麦类试验站进行,该地区属中温带大陆性半荒漠干旱性气候,年平均气温 5.5℃,年平均相对湿度 60%,年平均降水量 269.4 mm,年蒸发量 2 141 mm,无霜期平均 156 d,年日照时数 2 280~3 230 h。试验地土壤类型为沙壤土。

试验采用完全随机区组设计,各品种春小麦分别于 2022 年 4 月 3 日和 2023 年 4 月 2 日采用人工方式统一播种,播量 600 万粒 · hm⁻²,行距 20 cm,小区面积 6 m²(2 m×3 m),每个处理重复 3 次;收获日期分别为 2022 年 7 月 28 日和 2023 年 7 月 25 日。全生育期灌水 7 次,总灌水量 3 150 m³ · hm⁻²,播前施基肥磷酸二铵(含 N 18%、P₂O₅ 46%) 225 kg · hm⁻²、尿素(含 N 46.7%) 150 kg · hm⁻²,拔节期追施氮肥 150 kg · hm⁻²,各小区统一进行田间管理。

表 1 供试春小麦材料来源、选育方式及审定时间

Table 1 Source, breeding method, and approval time of experimental spring wheat materials

品种名称 Variety	亲本(或来源) Breeding parent (or source)		选育方式 Breeding method	审定年份 Validation year
	母本 Female parent	父本 Male parent		
新春 2 号 Xinchun 2	赛洛斯 Sailuosi	奇春 4 号 Qichun 4	杂交和辐射育种 Hybridization	1984
新春 3 号 Xinchun 3	赛洛斯 Sailuosi	奇春 4 号 Qichun 4	辐射育种 Radiation breeding	1986
新春 4 号 Xinchun 4	(151×74-6)×74-6	沃尔森 Woersen	杂交育种 Hybridization breeding	1990
新春 5 号 Xinchun 5	繁 6 Fan 6	6038	杂交育种 Hybridization breeding	1990
新春 6 号 Xinchun 6	中 7903 Zhong 7903	改良新春 2 号 Xinchun 2	杂交育种 Hybridization breeding	1993
新春 7 号 Xinchun 7	中 7906 Zhong 7906	改良新春 2 号 Xinchun 2	杂交育种 Hybridization breeding	1997
新春 8 号 Xinchun 8	C02	21-3	杂交育种 Hybridization breeding	1997
新春 9 号 Xinchun 9	NS65		引种 Introduced varieties	1999
新春 10 号 Xinchun 10	9-3-3X	新春 4 号 Xinchun 4	杂交育种 Hybridization breeding	2002
新春 11 号 Xinchun 11	新春 2 号 Xinchun 2	86-7	杂交育种 Hybridization breeding	2002
新春 12 号 Xinchun 12	8021	77-13	杂交育种 Hybridization breeding	2003
新春 13 号 Xinchun 13	加拿大白籽软质小麦 Canada white seed soft wheat		引种 Introduced varieties	2003
新春 14 号 Xinchun 14	国际玉米小麦改良中心引进 Introduction of CIMMIYT		引种 Introduced varieties	2004
新春 15 号 Xinchun 15	F5 繁 24 F5 fan 24	85037	杂交育种 Hybridization breeding	2004
新春 16 号 Xinchun 16	86-26B	93 鉴 29 93 jian 29	杂交育种 Hybridization breeding	2004
新春 17 号 Xinchun 17	新春 6 号 Xinchun 6	NS64	杂交育种 Hybridization breeding	2005
新春 18 号 Xinchun 18	解放 4 号 Jiefang 4	919	杂交育种 Hybridization breeding	2005
新春 19 号 Xinchun 19	新春 4 号 Xinchun 4	新春 5 号 Xinchun 5	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 20 号 Xinchun 20	昌春 6 号 Changchun 6	M85-30	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 21 号 Xinchun 21	春 946 Chun 946	NS-23-3	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 22 号 Xinchun 22	Tal	1265	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 23 号 Xinchun 23	KAMBARAI (Introduction of CIMMIYT)		引种 Introduced varieties	2006
新春 24 号 Xinchun 24	巴春 1 号 Bachun 1	哈春 5 号 Hachun 5	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 25 号 Xinchun 25	新春 6 号 Xinchun 6	73②/III	杂交育种 Hybridization breeding	2006
新春 26 号 Xinchun 26	新春 9 号 Xinchun 9	新春 6 号 Xinchun 6	辐射育种 Radiation breeding	2007
新春 27 号 Xinchun 27	91182299	高代品系 21-4 High generation series	杂交育种 Hybridization breeding	2007
新春 28 号 Xinchun 28	国际玉米小麦改良中心引进 Introduction of CIMMIYT		引种 Introduced varieties	2007
新春 29 号 Xinchun 29	高代材料 85~56 High generation lines 85-56	25-3	杂交育种 Hybridization breeding	2008
津强 5 号 Jinqiang 5	辽春 10 号 Liaochun 10	津强 1 号 Jinqiang 1	杂交育种 Hybridization breeding	2008
新春 30 号 Xinchun 30	新春 9 号 Xinchun 9	新春 6 号 Xinchun 6	辐射育种 Radiation breeding	2009
新春 31 号 Xinchun 31	12-25	96-5	杂交育种 Hybridization breeding	2009
新春 32 号 Xinchun 32	97-18	永良 11 号 Yongliang 11	杂交育种 Hybridization breeding	2009
新春 33 号 Xinchun 33	新春 9 号 Xinchun 9	新春 6 号 Xinchun 6	辐射育种 Radiation breeding	2010

续表 1
Continued table 1

品种名称 Variety	亲本(或来源) Breeding parent (or source)		选育方式 Breeding method	审定年份 Validation year
	母本 Female parent	父本 Male parent		
新春 34 号 Xinchun 34	88(13)	5×44	杂交育种 Hybridization breeding	2011
新春 35 号 Xinchun 35	巴 96-4870 Ba 96-4870	93 鉴 29 93 jian 29	杂交育种 Hybridization breeding	2011
新春 36 号 Xinchun 36	春小麦 21-6 Spring wheat 21-6	外引黑小麦 Imported black wheat	杂交育种 Hybridization breeding	2011
新春 37 号 Xinchun 37	May-49	野猫 Yemao	辐射育种 Radiation breeding	2012
新春 38 号 Xinchun 38	原 212 Yuan 212	97-46-3	杂交育种 Hybridization breeding	2012
新春 39 号 Xinchun 39	埃及 NS64 Egypt NS64	新春 8 号 Xinchun 8	杂交育种 Hybridization breeding	2012
新早 688 Xinhan 688	90J210	Y-5	杂交育种 Hybridization breeding	2012
新春 40 号 Xinchun 40	新春 6 号 Xinchun 6	UC1041	辐射育种 Radiation breeding	2013
新春 41 号 Xinchun 41	H101	C8501	杂交育种 Hybridization breeding	2013
津强 7 号 Jinjiang 7	冬丰 701/小冰麦 33 Dongfeng 701/Xiaobingmai 33	津强 2 号 Jinjiang 2	杂交育种 Hybridization breeding	2013
新春 42 号 Xinchun 42	2001-29	12-3	杂交育种 Hybridization breeding	2014
宁 2038 Ning 2038	TK95-3	野生大赖草与宁春 4 号的杂交后代 Hybrid offspring of wild <i>Leymus Chinensis</i> and Ningchun 4	杂交育种 Hybridization breeding	2014
新春 43 号 Xinchun 43	90-33	新春 6 号 Xinchun 6	杂交育种 Hybridization breeding	2015
新春 44 号 Xinchun 44	17-11	Yn-76	杂交育种 Hybridization breeding	2015
新春 45 号 Xinchun 45	2001-54	武春 3 号 Wuchun 3	杂交育种 Hybridization breeding	2015
新春 46 号 Xinchun 46	12-2	新春 14 Xinchun 14	辐射育种 Radiation breeding	2017
新春 47 号 Xinchun 47	新春 7 Xinchun 7	新春 21 Xinchun 21	辐射育种 Radiation breeding	2017
新春 48 号 Xinchun 48	新春 18 Xinchun 18	P03J1/34	杂交育种 Hybridization breeding	2017
新春 49 号 Xinchun 49	97-46-3	新春 11 Xinchun 11	杂交育种 Hybridization breeding	2017
新春 50 号 Xinchun 50	新春 22 号 Xinchun 22	08-18	杂交育种 Hybridization breeding	2017
新春 51 号 Xinchun 51	安农 90202 Annong 90202	新春 11 号//永 3119 Xinchun 11//Yong 3119	杂交育种 Hybridization breeding	2017
粮春 1242 Liangchun 1242	9H15	C-172	杂交育种 Hybridization breeding	2018
粮春 1201 Liangchun 1201	昌春 6 号 Changchun 6	新春 6 号 Xinchun 6	杂交育种 Hybridization breeding	2018
奇春 12136 Qichun 12136	无芒春早 Wumang Chunzao	新春 25 号 Xinchun 25	杂交育种 Hybridization breeding	2018
津强 11 号 Jinjiang 11	S06K-16	S08 元鉴 109 S08 yuanjian 109	杂交育种 Hybridization breeding	2018
核春 137 Hechun 137	plot 9787	新春 11 号 Xinchun 11	杂交育种 Hybridization breeding	2018
粮春 1354 Liangchun 1354	p03J	47×93-43	杂交育种 Hybridization breeding	2021
粮春 1571 Liangchun 1571	新春 29 号 Xinchun 29	新春 10 号 Xinchun 10	杂交育种 Hybridization breeding	2022
粮春 1522 Liangchun 1522	0613	新春 21 号 Xinchun 21	杂交育种 Hybridization breeding	2022
禾力 1881 Heli 1881	小黑麦匈 64 Xiong 64	H221	杂交育种 Hybridization breeding	2022
粮春 1758 Liangchun 1758	09Z/52	新春 26 号 Xinchun 26	杂交育种 Hybridization breeding	2024
粮春 1725 Liangchun 1725	矮败小麦 Dwarfing-sterile wheat	新春 18 号、新春 9 号、Y-20、新春 12 号、新春 10 号、新春 15 号、新春 6 号和新春 27 号 Xinchun 18, Xinchun 9, Y-20, Xinchun 12, Xinchun 10, Xinchun 15, Xinchun 6 and Xinchun 27	杂交育种 Hybridization breeding	2024

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片 SPAD 值 在小麦灌浆期,使用 SPAD-502 叶绿素仪,连续测量旗叶底部、中部和顶部的 SPAD 值,取累计平均值为该旗叶的 SPAD 值,各小区测定 10 片旗叶。

1.3.2 叶片光合参数 在小麦灌浆期,用 LI-6800 光合仪于晴天 11:00—13:00 测定各品种旗叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等指标,每个小区测定 3 片旗叶。

1.3.3 叶片叶绿素荧光参数 在小麦灌浆期,用 Handpocket-PEA 型植物效率仪测定各处理小麦叶片荧光参数:最大光合效率比率(F_v/F_m)、最小荧光与最大荧光比率(F_o/F_m)和吸光效率指数(PI_{abs}),每个小区测定 5 片旗叶。

1.3.4 干物质积累量 在小麦灌浆期,每个小区随机收取长势一致的 10 个单茎,分为叶片、茎秆+叶鞘和穗 3 个部分,在烘箱中 105℃ 杀青 15 min,80℃ 烘干至恒重,分别称重。

1.3.5 小麦产量 在小麦成熟期,各小区单独收获脱粒测产,并折合为公顷产量。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,IBM SPSS Statistics 26 和 Origin 2021 进行数据分析和作图。计算 Shannon 多样性指数,划分数量性状,1 级 $\leq X-2\delta$,10 级 $>X+2\delta$,中间每级间差 0.5 δ , X 为性状平均值, δ 为标准差,通过计算每一级的相对频率(P_i)来计算多样性指数(H')。

2 结果与分析

2.1 不同年代春小麦品种光合特性的统计分析

SPAD 值代表叶片叶绿素含量的相对值,也代表了植株的绿色程度。由表 2 可知,不同品种春小麦 SPAD 值变化范围介于 48.50~63.09 之间,平均值为 55.72,变异系数较小(4.07%)。不同品种春小麦 P_n 值变化范围介于 11.00~28.09 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

之间,品种间差异较大,变异系数最大(17.43%),其中,‘新春 5 号’的 P_n 值最低,‘新春 47 号’的 P_n 值最高。不同春小麦品种 T_r 均值为 11.76 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中,‘新春 3 号’最低(7.13 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),‘新春 35 号’最高(15.31 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。 F_v/F_m 和 F_o/F_m 分别介于 0.83~0.86 和 0.13~0.17 之间,其值变化范围较小,变异系数较低。 PI_{abs} 反映光合系统受环境影响最敏感的参数,各品种 PI_{abs} 值介于 11.41~23.29 之间,变异系数较大,为 14.55%。

65 份小麦材料 H' 介于 1.81~2.03 之间,多样性指数整体较优,其中 F_o/F_m 的多样性指数最低(1.81), C_i 最高(2.03)。不同光合指标多样性指数表现为 $C_i > P_n > PI_{abs} > T_r > F_v/F_m > G_s > \text{SPAD} > F_o/F_m$ 。

2.2 不同年代春小麦品种光合特性的聚类分析

以 P_n 、 T_r 、 C_i 等小麦主要光合参数为指标,将 65 份小麦材料分为四大类群(图 1,见 19 页;表 3)。第 I 类群共 12 个品种,占总材料的 18.46%,此类群小麦品种的 SPAD 值和 P_n 均表现适中,但具有较高的 C_i 值,表明这些品种在光合作用过程中可能面临较大的光合抑制或水分胁迫,导致气孔导度较低。第 II 类群共 7 个品种,占总材料的 10.77%,此类群小麦品种的 SPAD 值较高,但 P_n 和 T_r 值均偏低, PI_{abs} 值累计平均最小(13.83),表明这些品种可能在光合作用效率方面存在某些限制,尽管其叶绿素含量较高,但可能由于气孔导度不足或光合效率较低而导致光合表现较差,此类群基本为 2000 年前审定品种。第 III 类群共 45 个品种,占总材料的 69.23%,此类群小麦品种拥有较高的 P_n 和 T_r 值,光合性能指数 PI_{abs} 值累计平均最大(16.65),说明这些品种在光合作用过程中表现出较高的光合能力,可能具备较好的抗逆性和较高的光合效率。第 IV 类群仅 1 个品种,为‘新春 47 号’,其 P_n 值最大, C_i 值最低, G_s 值最大,表明其在光合作用过程中具有极强的光合能力和气孔导度,适应性较强。

表 2 小麦主要光合参数的遗传多样性
Table 2 Genetic diversity of main photosynthetic parameters in wheat

指标 Index	叶绿素含量 SPAD	P_n / $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	T_r / $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	C_i / $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	G_s / $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	F_v/F_m	F_o/F_m	PI_{abs}	平均值 Average
均值 Mean	55.72	18.41	11.76	317.34	0.43	0.84	0.16	16.10	
变化范围 Range	48.50~63.09	11.00~28.09	7.13~15.31	283.19~355.15	0.30~0.58	0.83~0.86	0.13~0.17	11.41~23.29	
SD	2.27	3.21	1.58	15.67	0.05	0.01	0.01	2.34	
CV/%	4.07	17.43	13.41	4.94	12.18	0.68	4.43	14.55	8.96
多样性指数 H'	1.96	2.02	1.98	2.03	1.97	1.98	1.81	1.99	1.97

2.3 不同年代春小麦灌浆期干物质占比及产量分析

由图 2 可知,随着审定年代的推进,叶片和穗的干物质占比呈上升趋势,茎秆的干物质占比呈下降趋势。1985—2024 年间,叶片占总干物质的比例变化幅度较大,其中‘津强 11 号’叶片干物质占比仅为 8.66%,‘新春 43 号’叶片干物质占比则达到 21.35%。穗的干物质占比相比叶片的变化幅度较小,基本维持在 35.28%左右,并随着审定年代的推进逐渐增加,2000 年后也有穗干物质占比比较高的品种出现,其中,‘津强 5 号’和‘津强 11 号’穗干物质占比分别达到 52.04%和 55.77%。茎秆的干物质占比维持在 49.85%左右,并随年代的推进逐减降低,其

中,‘新早 688’茎秆干物质占比最大,达到 56.98%;‘津强 11 号’茎秆干物质占比最小,仅为 35.56%。

在产量方面,随着审定年代的推进,春小麦产量呈上升趋势,产量排名前 10 的品种中,2010 年后审定的品种占比达 70.00%。各品种产量在 4 443.3~8 582.4 kg·hm⁻²之间变动,其中,‘粮春 1571’产量最高,为 8 582.4 kg·hm⁻²;‘津强 5 号’产量最低,为 4 443.3 kg·hm⁻²(图 3)。

2.4 不同年代春小麦光合性状的主成分分析

对 65 份小麦材料 8 个性状的原始数据标准化后进行主成分分析(表 4),按照特征值大于 1 的原则,提取累计贡献率为 73.429%的 3 个主成分。第 1 主成分特征值为 2.362,方差贡献率为 29.524%,在

表 3 不同群组春小麦的主要光合参数									
Table 3 Main photosynthetic parameters of spring wheat in different groups									
群组 Group	数目 Number	叶绿素含量 SPAD	$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	G_s ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	F_v/F_m	F_o/F_m	PI_{abs}
I	12	55.62	16.66	11.32	331.28	0.44	0.84	0.16	15.51
II	7	56.60	14.26	9.97	347.43	0.41	0.84	0.16	13.83
III	45	55.61	19.31	12.16	309.69	0.44	0.84	0.16	16.65
IV	1	55.61	28.09	11.57	283.19	0.46	0.84	0.16	14.08

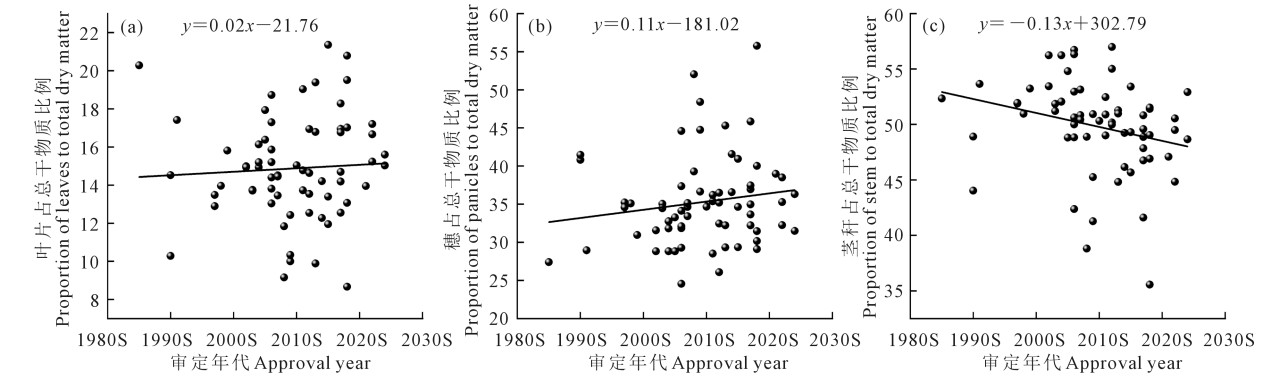


图 2 不同审定年代春小麦品种各部分干物质占比变化

Fig.2 Changes in the proportion of dry matter in different parts of spring wheat varieties approved in different years

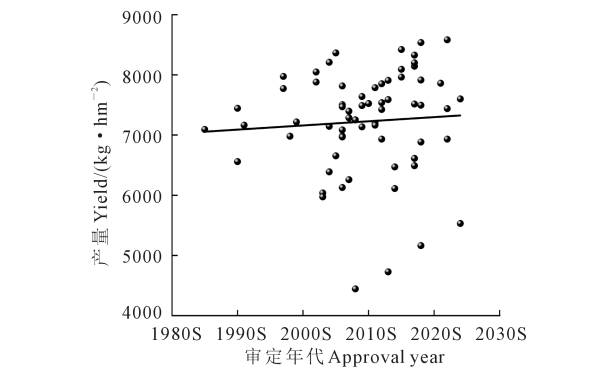


图 3 不同审定年代春小麦品种产量表现

Fig.3 Yield performance of spring wheat varieties approved in different years

表 4 主成分特征值及特征向量描述			
Table 4 Eigenvalues and eigenvectors of the principal components			
性状 Trait	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
F_v/F_m	0.923	0.118	0.081
F_o/F_m	-0.901	-0.162	-0.115
PI_{abs}	0.641	0.412	0.107
C_i	0.021	-0.802	0.479
P_n	-0.110	0.767	-0.387
T_r	-0.333	0.717	0.451
G_s	-0.368	0.470	0.656
SPAD	0.171	-0.042	0.540
特征值 Eigenvalue	2.362	2.178	1.335
方差贡献率 Contribution rate/%	29.524	27.219	16.686
累计贡献率率 Accumulated contribution rate	29.524	56.743	73.429

其特征向量中,载荷较高且符号为正的性状为 F_v/F_m (0.923) 和 PI_{abs} (0.641), F_v/F_m 值反映了光合反应中心全部开放时的光能传递效率,而 PI_{abs} 是以吸收光能为基础的光合性能指数,为表征光合系统受到环境影响的最敏感的参数。第 2 主成分特征值为 2.178,在其特征向量中,载荷较高且符号为正的性状为 P_n (0.767) 和 T_r (0.717)。第 3 主成分的特征值为 1.335,在其特征向量中,载荷较高且符号为正的性状为 G_s (0.656) 和 C_i (0.479)。

2.5 相关性分析

对小麦主要光合参数与产量之间进行相关性分析(图 4)表明, P_n 与产量之间呈显著正相关关系

($P<0.05$), 相关系数为 0.28, 表明 P_n 的提高与产量的增加存在一定的正相关关系。 T_r 与 G_s 、 F_v/F_m 与 PI_{abs} 呈显著正相关关系($P<0.01$), 相关系数分别为 0.67 和 0.47, 表明这些光合因子之间的相互作用对小麦光合作用效率具有显著影响。 C_i 与 PI_{abs} 呈显著负相关关系($P<0.01$), 相关系数为 -0.71。 F_v/F_m 与 F_o/F_m 之间呈极显著负相关关系($P<0.01$), 相关系数为 -0.90, 反映了两者在光合作用适应性方面的密切关系,尤其是在光照强度变化对植物光合作用影响的条件下。

2.6 春小麦品种的综合评价

根据各主成分的特征值及其标准值计算不同品种的各主成分值,进而以各主成分的贡献率为权重,对 3 个主成分进行线性加权,分别计算 65 份春小麦品种的综合评价并排序。综合评价得分越高,表明品种表现越好,参试春小麦品种综合评价值介于 -15.70~ -8.37 之间。排名前 10 的材料依次为‘新春 41 号’、‘新春 31 号’、‘新春 47 号’、‘新春 40 号’、‘新春 46 号’、‘粮春 1354’、‘新春 37 号’、‘新春 30 号’、‘粮春 1758’和‘新春 34 号’(表 5)。

3 讨 论

光合作用是作物产量的决定因素^[14]。选择适宜的品种是提高小麦产量的基础,高产小麦品种通常具备较强的适应性、优良的抗逆性和高效的光合作用能力^[15]。因此,通过不同年代春小麦品种光合特性的遗传分析,了解其在实际生产中的表现很有必要。净光合速率是评价植物生长状况的关键指标^[16], 本研究中,65 份春小麦材料净光合速率介于 11.00~28.09 之间,变异系数为 17.43%,多样性指数较大,说明不同品种间存在较大差异;相关性分析表明,净光合速率与蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度的相关性均达到显著水平,这与前人研究结果一致^[17]。张

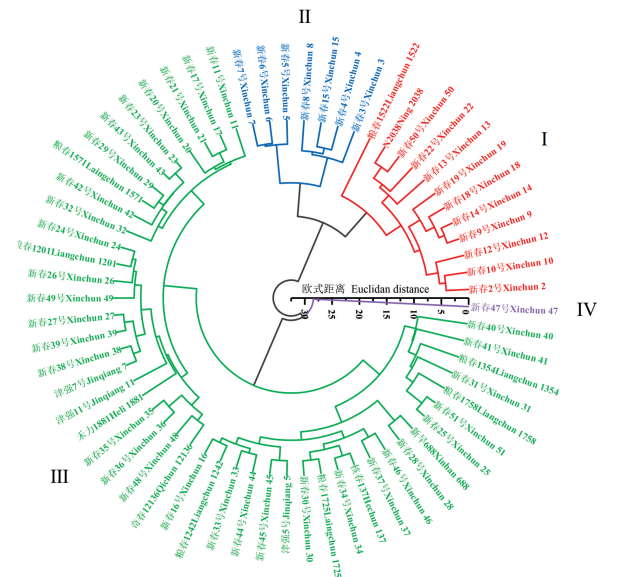
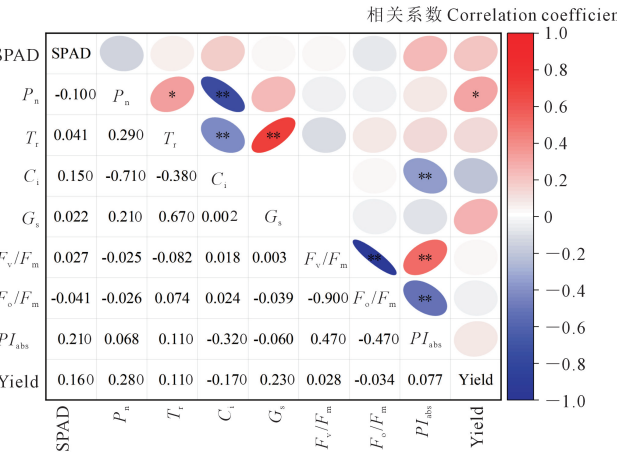


图 1 不同审定年代春小麦聚类分析图
Fig.1 Cluster analysis diagram of srping wheat approved in different years



注: *、* * 分别表示相关性在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著。
Note: *, * * indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 4 不同审定年代小麦品种光合特性和产量的相关性分析
Fig.4 Correlation analysis of photosynthetic characteristics and yield of wheat varieties approved in different years

表 5 排名前 10 位的小麦材料综合得分及排序		
Table 5 Comprehensive score and ranking of the top 10 wheat materials		
品种名称 Variety name	综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
新春 41 号 Xinchun 41	-8.37	1
新春 31 号 Xinchun 31	-8.93	2
新春 47 号 Xinchun 47	-8.94	3
新春 40 号 Xinchun 40	-9.52	4
新春 46 号 Xinchun 46	-9.70	5
粮春 1354 Liangchun 1354	-9.74	6
新春 37 号 Xinchun 37	-9.76	7
新春 30 号 Xinchun 30	-9.79	8
粮春 1758 Liangchun 1758	-9.95	9
新春 34 号 Xinchun 34	-10.18	10

占琴等^[18]研究表明,提高光合效率有助于促进作物干物质的积累和产量的形成。高翠民等^[19]研究也发现,提高叶片净光合速率有助于提高小麦产量。本研究中,‘新春 47 号’、‘粮春 1758’、‘新春 31 号’、‘新春 41 号’和‘新春 48 号’的 P_n 、 T_r 和 G_s 较高, C_i 较低,光合性能优于其他品种;其产量也表现优异,其中‘新春 47 号’、‘新春 31 号’和‘新春 48 号’的产量分别为 8 143.20、7 488.82 kg · hm⁻² 和 8 328.00 kg · hm⁻²,较其他品种平均提高 4.18% ~ 15.85%,进一步验证了光合效率与产量的正相关关系。

随着小麦品种的遗传改良,光合特性和干物质分配比例发生了显著变化。本研究中,65 份供试小麦材料被聚类为四大类群,各类群间小麦品种光合特性存在显著差异,且每个类群小麦品种数量占比不同,类群 I、II、III 和 IV 小麦材料占比分别为 18.46%、10.77%、69.23% 和 1.54%。金艳等^[20]将黄淮南片小麦品种(系)聚类分为四大类群,材料数量占比分别为 21.52%、11.39%、18.99% 和 48.10%。孙刚等^[21]对宁夏春麦区 228 份小麦资源的株高和籽粒性状进行聚类分析,不同类群资源占比分别为 25.44%、21.93%、7.46%、32.02% 和 13.16%。李晓荣等^[22]对西南麦区 96 份小麦育种材料进行聚类分析,不同类群占比分别为 86.46%、4.17%、3.13%、1.04%、3.13% 和 2.08%。通过梳理不同地区供试小麦材料聚类结果发现,各麦区均存在品种遗传差异欠丰富、相似性较大的问题,这可能是由于品种的选育中相似亲本的大量使用导致,因此,有必要对种质资源进行评估,以便更好地利用和创新种质资源。

不少学者研究表明,净光合速率与单株干物质积累量呈正相关关系^[23-24]。在遗传改良过程中,随着品种审定年份的推移,小麦净光合速率和干物质分配比例趋向优化,为产量的提高奠定了基础。本研究中,2009 年后审定的‘新春 47 号’、‘新春 31 号’和‘新春 48 号’等品种的光合性能显著优于其他品种,产量也有很大提升;且随着育成年份的推进,穗和叶的干物质占比逐渐增加,其中‘津强 11 号’、‘津强 5 号’、‘新春 31 号’、‘新春 50 号’和‘津强 7 号’5 个品种均为 2000 年后审定品种,其穗的干物质分配比例均达到 45% 以上。针对不同春小麦品种,前人在提高光合速率和改善叶片光合效率方面的研究取得了积极成果^[18-19]。未来研究将关注如何通过品种改良进一步优化光合效率和干物质分配,以促进小麦的产量和品质提升。

4 结 论

新疆地区不同春小麦品种的光合特性差异显著。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和叶绿素荧光比值(F_v/F_m)对产量影响显著,这些光合因子的提高与产量增加密切相关。主成分分析将 8 个性状提炼为 3 个主成分,累计贡献率为 73.429%。‘新春 41 号’、‘新春 31 号’、‘新春 47 号’、‘新春 40 号’、‘新春 46 号’、‘粮春 1354’、‘新春 37 号’、‘新春 30 号’、‘粮春 1758’和‘新春 34 号’的综合得分较高,产量介于 7 488.82 ~ 8 143.20 kg · hm⁻² 之间,其中‘新春 47 号’的产量最高,较平均产量(7 225.44 kg · hm⁻²)提升显著,具有较强的光合效率和较高的产量潜力,可作为高光效品种在新疆地区进行育种利用和推广种植。

参 考 文 献:

- [1] 国家统计局人口和就业统计司. 中国人口和就业统计年鉴-2023 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Department of Population and Employment Statistics, National Bureau of Statistics. China Population & Employment Statistical Yearbook 2023 [J]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [2] BAHRAANI A, SHARIF A H H, SARVESTANI Z T, et al. Remobilization of dry matter in wheat: effects of nitrogen application and post-anthesis water deficit during grain filling[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2011, 39(4): 279-293.
- [3] 吴金芝, 王荣荣, 黄明, 等. 干旱下小麦旗叶在灌浆期下午保持高光合速率的生理机制[J]. 植物生理学报, 2024, 60(3): 573-584.
WU J Z, WANG R R, HUANG M, et al. Physiological mechanism of flag leaf on maintaining high photosynthetic rate in the afternoon during the grain filling stage in wheat under drought [J]. Plant Physiology Journal, 2024, 60(3): 573-584.
- [4] 郭华. 不同年代小麦品种光合效率和氮素吸收利用的差异及其生理机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
GUO H. Differences and physiological mechanisms in photosynthetic and nitrogen absorption and utilization of wheat cultivars released in different era[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [5] 张素瑜, 岳俊芹, 李向东, 等. 施氮对郑麦 366 光合速率、花后干物质积累及产量的影响[J]. 作物杂志, 2024, (3): 127-132.
ZHANG S Y, YUE J Q, LI X D, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic rate, dry matter accumulation after anthesis and yield of Zhengmai 366[J]. Crops, 2024, (3): 127-132.
- [6] CAO X C, ZHONG C, ZHU C Q, et al. Variability of leaf photosynthetic characteristics in rice and its resistance to water stress under different nitrogen nutrition regimes [J]. Physiologia Plantarum, 2019, 167: 613-627.
- [7] 何雨桔, 刘琼, 王焜, 等. 施氮量对不同株叶型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(5): 707-713.
HE Y J, LIU Q, WANG K, et al. Effects of nitrogen application rate on flag leaf photosynthesis and grain filling characteristics of wheat with different leaf types [J]. Journal of Sichuan Agricultural

- University, 2022, 40(5): 707-713.
- [8] AVICE J C, ETIENNE P. Leaf senescence and nitrogen remobilization efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(14): 3813-3824.
- [9] 刘德政, 卢山, 高坤奥, 等. 大田和旱棚环境下小麦旗叶气孔性状变异及其与光合参数的关系[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 360-369.
- LIU D Z, LU S, GAO S A, et al. Variations of flag leaf and stomatal traits of wheat in field and drought shed environment [J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(3): 360-369.
- [10] 里程辉, 刘志, 王宏, 等. 干旱胁迫下不同中间砧对“岳冠”苹果叶片光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 83-91.
- LI C H, LIU Z, WANG H, et al. Effects of different interstocks on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of ‘Yueguan’ apple under different drought stress conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 83-91.
- [11] 方辉, 范贵强, 高永红, 等. 施氮对不同小麦品种光合荧光特性及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(1): 55-62.
- FANG H, FAN G Q, GAO Y H, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic fluorescence and yield of different wheat varieties [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(1): 55-62.
- [12] 坚天才, 吴宏亮, 康建宏, 等. 氮素缓解春小麦花后高温早衰的荧光特性研究[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3355-3368.
- JIAN T C, WU H L, KANG J H, et al. Fluorescence characteristics study of nitrogen alleviating premature senescence of spring wheat at high temperature after anthesis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3355-3368.
- [13] 唐晓培, 杨丽, 冯冬雪, 等. 非充分灌溉下 8 个小麦品种旗叶光合与产量及水分利用效率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 245-252, 265.
- TANG X P, YANG L, FENG D X, et al. Relationship between flag leaves photosynthesis and yield, water use efficiency of eight wheat varieties under deficit irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 245-252, 265.
- [14] DEPAUW F A, ROGATO A, RIBERA D’ALCALÁ M, et al. Exploring the molecular basis of responses to light in marine diatoms [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(4): 1575-1591.
- [15] 杨淑琴. 冬小麦高产栽培及病虫害绿色综合防控技术[J]. 种子科技, 2024, 42(8): 109-111.
- YANG S Q. High yield cultivation of winter wheat and green comprehensive prevention and control techniques for pests, diseases, and weeds [J]. Seed Science & Technology, 2024, 42(8): 109-111.
- [16] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因素研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100-111.
- PING X Y, ZHOU G S, SUN J S. Advances in the study of photosynthate allocation and its controls [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 100-111.
- [17] 靳甜甜, 傅伯杰, 刘国华, 等. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1783-1793.
- JIN T T, FU B J, LIU G H, et al. Diurnal changes of photosynthetic characteristics of *Hippophae rhamnoides* and the relevant environment factors at different slope locations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(7): 1783-1793.
- [18] 张占琴, 张力, 田海燕, 等. 不同前茬作物对小麦田土壤养分及小麦光合性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 30-41.
- ZHANG Z Q, ZHANG L, TIAN H Y, et al. Effects of different preceding crops on soil nutrient content and photosynthetic characteristics of wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 30-41.
- [19] 高翠民, 杨永辉, 韩伟锋, 等. 水氮运筹对滴灌冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(7): 885-893.
- GAO C M, YANG Y H, HAN W F, et al. Effect of water and nitrogen management on yield, and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation [J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(7): 885-893.
- [20] 金艳, 宋全昊, 肖永贵, 等. 黄淮南片麦区 79 份小麦品种(系)的遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(5): 1296-1306.
- JIN Y, SONG Q H, XIAO Y G, et al. Genetic diversity analysis of 79 wheat varieties (lines) in southern Huang-Huai wheat region [J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(5): 1296-1306.
- [21] 孙刚, 陈佳静, 姚明明, 等. 宁夏春麦区小麦资源株高、籽粒性状及抗病性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(4): 954-971.
- SUN G, CHEN J J, YAO M M, et al. Analysis of wheat resources for plant height, grain traits, and diseases resistance cultivated in Ningxia spring wheat region [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(4): 954-971.
- [22] 李晓荣, 张中平, 孙永海, 等. 西南麦区 96 份小麦育种材料重要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2358-2368.
- LI X R, ZHANG Z P, SUN Y H, et al. Genetic diversity of 96 wheat breeding materials in the southwest wheat region based on important agronomic traits [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(9): 2358-2368.
- [23] 陈梦茹, 邢英英, 张帆, 等. 不同灌水定额下缓释氮肥与尿素混掺对玉米生长和产量及水肥利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(7): 1235-1248.
- CHEN M R, XING Y Y, ZHANG F, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth, yield and water-fertilizer use efficiency under different irrigation levels [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(7): 1235-1248.
- [24] 汤文华, 窦全琴, 潘平平, 等. 不同薄壳山核桃品种光合特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 81-88.
- TANG W H, DOU Q Q, PAN P P, et al. Photosynthetic characteristics of grafted plants of different *Carya illinoensis* varieties [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(3): 81-88.