



枸杞光合特性评价及高光效指标筛选

何昕孺,王玉静,李妍颖,张波,黄婷,
尹跃,段淋渊,秦垦,戴国礼

(国家枸杞工程技术研究中心/宁夏农林科学院 枸杞科学研究所,银川 750002)

摘要 通过对枸杞种质的光合特性进行综合评价,以期筛选出高光效种质,为枸杞品种选育提供参考依据。采用大田试验,连续2 a对76份枸杞种质材料的光合气体交换参数、叶片物理性状指标进行测定,利用主成分分析、层次分析法、聚类分析法对枸杞种质的光合特性进行综合评价,筛选出合理的高光效评价指标。结果表明:枸杞种质间净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、水分利用率、叶面积、叶鲜质量、叶干质量均存在极显著差异,其中气孔导度、叶鲜质量、叶干质量、比叶重、叶面积的变异系数大,为46.3%~57.6%,胞间CO₂浓度、水分利用率的变异系数小,在10.9%~27.4%。利用主成分分析,提取到3个主成分,累计贡献率达86.88%,具有代表性,筛选出净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、比叶重作为评价指标,通过层次分析法得出权重值依次为蒸腾速率>比叶重>叶鲜质量>气孔导度>叶面积>净光合速率>胞间CO₂浓度。通过聚类分析将76份材料划分为3种类型,低光效型6个,中等光效型51个,高光效型19个。利用判别分析对聚类结果重新进行分类,只有1个材料被误判,总误判率为1.32%,判对的概率为98.68%,分类结果可靠,可为后续新品种选育提供材料。

关键词 枸杞;高光效;筛选指标;综合评价

中图分类号 S722

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2022)07-0893-09

枸杞是“药食两用”植物资源,具有巨大的药用和经济价值。随着人们对枸杞营养保健功效的不断认识和认可,枸杞的市场需求日益旺盛^[1]。枸杞种质资源虽种类丰富,但因遗传背景不清楚,制约了种质资源深度挖掘与新品种选育,目前生产中的主栽品种优良性状退化,产量低,新品种少且推广速度缓慢,已不能满足产业多样化的发展需求^[2]。光合能力和效率的改善是提高作物产量的主要途径。因此高光效种质的筛选是挖掘光合增产潜力,高光效育种的基础和前提^[3-4]。在水稻、大豆等作物上已有高光效种质筛选及选育的大量研究^[5-9],屠层平等^[10-11]在水稻高光效育种中的研究认为,单叶净光合速率、叶面积指数、高效光合持续期是实现高光合生产力的重要光合特性。有研究表明^[12-16]多年在大豆高光效育种中选育出在光合特性、光合势、单株叶面积、RUBP羧化酶和光合产物的积累有较大遗传改进的高光效

种质,认为单叶光合速率是高光效育种的重要指标之一,同时结合育种目标应具有较大的光能截获能力、光能高速传递能力、高光能转化效率、高光合速率和高RUBP羧化酶、光合产物在籽粒中高比例分配、高光合持续期等综合水平。牛宁等^[17]对150份大豆光合特性的评价认为高光效大豆应具有高气孔导度、高水分利用率和高光合效率等特性。张华等^[18]利用主成分分析、聚类分析、判别分析相结合的方法研究152份甘蔗光合特性,认为净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率结合较好的品种可应用于光合生理育种。张耀文等^[19]在油菜高光效育种研究中认为高光效种质筛选指标应从光合气体交换参数、光合生理结构等光合能力,单株、群体等株型、产量结构,抗病、虫等抗性能力及品质性状等方面综合评价、量化比较。目前枸杞种质资源的挖掘及品种选育主要以多糖、单果质量、抗性、果实大小等为目标性状,

收稿日期:2021-09-15 **修回日期:**2021-12-06

基金项目:宁夏自然科学基金(2020AAC03288);宁夏农林科学院科技平台建设提升项目(NKYP-19-13);宁夏回族自治区农业育种专项(2018NYYZ0102)。

第一作者:何昕孺,女,硕士,助理研究员,从事枸杞育种与栽培研究工作。E-mail:hhxinru@163.com

通信作者:戴国礼,男,硕士,副研究员,从事枸杞育种研究工作。E-mail:dgl2006swfc@163.com

枸杞光合特性的研究以环境因子、水分、肥料、盐碱胁迫等对光合气体参数的影响为主^[20],种质间光合特性的研究较少^[21-24]。因此,筛选枸杞光合能力评价指标,建立有效的综合评价方法,可以为枸杞新品种选育提供理论支撑。本研究连续 2 年对 76 份枸杞材料的叶片光合气体交换参数和叶片物理性状进行调查,评价枸杞种质资源的光合

能力,筛选出高光效材料,对推进枸杞育种和产量提升有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以宁夏银川市芦花台宁夏农林科学院枸杞种质资源圃的 76 份材料为供试材料(表 1)。

表 1 供试枸杞材料的编号及名称

Table 1 Code and name of tested wolfberry

编号 名称 Code Name	编号 名称 Code Name	编号 名称 Code Name	编号 名称 Code Name
1 宁杞 1 号 Ningqi No. 1	20 16-1-4-3	39 16-1-2-16	58 1-354
2 16-17-5-6	21 16-16-7-6	40 秦 2 Qin 2	59 1-243
3 14-12-419	22 16-16-9-2	41 秦 4-2 Qin4-2	60 1-261
4 14-402	23 16-23-8-10	42 秦 4-1 Qin4-1	61 1-264
5 大麻叶 <i>L. barbarum</i> Linn	24 16-16-8-17	43 14-87	62 1-173
6 14-02	25 16-1-3-5	44 14-16	63 1-181
7 Z168	26 14-26-6	45 0901	64 1-61
8 Z44	27 14-26-5	46 0902-1	65 2-182
9 14-03	28 14-01	47 0902-2	66 2-184
10 14-104	29 JC-14-1-10	48 HLB39	67 2-124
11 16-14-5-4	30 JC-16-2-11	49 0701	68 2-56
12 精杞 4 号 Jingqi No. 4	31 16-14-8-1	50 宁杞 7 号 Ningqi No. 7	69 2-16
13 16-16-8-16	32 14-9-10	51 0704	70 中国枸杞 <i>Lycium chincnse</i> Mill.
14 Z166	33 402	52 宁杞 8 号 Ningqi No. 8	71 红枝枸杞 <i>Lycium dasystemum</i> Pojark Var.
15 14-401	34 JC-14-2-34	53 06-16	72 宁杞菜 1 号 Ningqi-vegetable No. 1
16 宁杞 5 号 Ningqi No. 5	35 16-14-8-9	54 13-19	73 宁杞黄变 <i>Lycium varieties</i>
17 14-4-4-13	36 JC-1-2-14	55 1-503	74 0903
18 14-2-3-20	37 16-23-14-1	56 1-400	75 截萼枸杞 <i>Lycium truncatum</i>
19 16-23-7-8	38 16-16-9-3	57 1-428	76 柱筒枸杞 <i>Lycium cylindricnm</i> Kuang.

1.2 测定方法

2019—2020 年于枸杞春梢现蕾期进行田间标样,标样要求参照[25],1 a 生果实成熟初期测定光合参数及叶片形态指标。

1.2.1 光合参数测定 利用德国 GFS-3000 便携式光合仪分别于 2019 年、2020 年 6—7 月,选择晴朗天气的上午 9:00—12:00 测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)参数,叶片瞬时水分利用效率(WUE)= P_n/T_r 。测定时设置气体流速 750 $\mu mol \cdot s^{-1}$,气体混匀器的风扇速度为 7,叶室温度为 30 $^{\circ}C$,相对湿度为 60%,利用外置光源将 PAR 设定为 1 500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,每份材料测 3 个叶片。

1.2.2 叶片形态指标测定 测定光合参数的同时,采集与其相对应的叶片,利用 Uniscan M1 紫光扫描仪测定叶面积,电子分析天平称量叶鲜质量,在 70 $^{\circ}C$ 烘干至恒质量,称叶干质量,比叶重=叶干质量/叶面积。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,使用 SPSS 21 进行方差分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析、判别分析。

2 结果与分析

2.1 枸杞光合气体交换参数及叶片形态指标的差异

由表 2 可知,2 a 中 2019 年枸杞叶片净光

合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、叶干质量、比叶重的变异系数高,在 2020 年水分利用率的变异系数高。结合 2 a 的数据看气孔导度、叶鲜质量、叶干质量、比叶重、叶面积的变异系数大,为 46.3%~57.6%,胞间 CO₂ 浓度、水分利用率的变异系数小,在 10.9%~27.4%。品种(系)间净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、水分利用率、叶面积、叶鲜

质量、叶干质量均存在极显著差异($P<0.01$),比叶重存在显著差异($P<0.05$);年份间净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、水分利用率、叶面积、叶干质量、比叶重均存在极显著差异($P<0.01$),叶鲜质量不存在显著差异;品种与年份互作效应对各指标均达到极显著水平($P<0.01$)。

表 2 枸杞光合参数及叶片形态指标的差异($\bar{x}\pm s$)

Table 2 Difference of photosynthetic parameter and leaf morphological index of wolfberry										
年份 Year	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) P_n	气孔导度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) G_s	胞间 CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) C_i	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) T_r	水分利用率 WUE	叶面积/mm ² Leaf area	叶鲜质量/g Leaf fresh mass	叶干质量/g Leaf dry mass	比叶重/ ($\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}$) Specific leaf mass	
2019 平均值±标准差 Means±SD	16.59±7.9	248.05±158.9	321.01±32.3	6.14±2.7	2.71±0.6	236.29±103.4	0.29±0.14	0.05±0.02	0.23±0.10	
变幅 Range	1.59~37.2	24.67~765.97	206.73~395.38	0.96~12.80	1.19~4.47	87.42~661.15	0.08~0.84	0.02~0.20	0.12~1.37	
变异系数/% CV	47.6	64.1	11.3	44.5	22.3	43.7	53.7	48	43.6	
2020 平均值±标准差 Means±SD	15.29±4.9	416.77±184.3	330.71±34.7	6.76±2.2	2.38±0.8	406.80±139.0	0.25±0.1	0.06±0.03	0.14±0.04	
变幅 Range	4.14~30.24	53.19~936.09	191.98~426.83	1.77~12.7	1.08~5.81	138.2~1 095.1	0.07~1.15	0.01~0.17	0.03~0.27	
变异系数/% CV	32.2	44.2	10.5	32.5	32.4	34.2	52.3	46.3	27.4	
2 年均值均值±标准差 Means±SD	15.9±6.6	332.4±191.5	325.8±35.8	6.45±2.5	2.55±0.7	321.54±149.2	0.26±0.14	0.05±0.03	0.18±0.09	
品种 Strain	13.421**	5.597**	3.624**	9.758**	2.495**	6.448**	12.711**	6.60**	4.416*	
年份 Year	18.416**	213.976**	17.228**	20.937**	45.468**	487.779**	0.290	13.944**	173.752**	
品种*年份 Strain*Year	7.947**	2.172**	4.608**	4.234**	3.785**	2.866**	4.264**	3.057**	1.654**	

注:数据后*和**分别表示 0.05 和 0.01 水平差异,下同。

Note: Values followed by * and ** are significant differences at 0.05 and 0.01, the same below.

2.2 叶片光合气体交换参数及形态特征指标的相关性分析

如表 3 所示,各指标呈现不同程度的相关性。净光合速率与气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、叶干质量呈极显著正相关;气孔导度与胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶

鲜质量、叶干质量呈极显著正相关;胞间 CO₂ 浓度与蒸腾速率呈极显著正相关,与水分利用率呈极显著负相关;蒸腾速率与叶面积、叶鲜质量、叶干质量呈极显著正相关;叶面积与叶鲜质量、叶干质量呈极显著正相关;叶鲜质量与叶干质量呈极显著正相关;叶干质量与比叶重呈极显著正相关。

表 3 各指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of each index										
指标 Index	净光合速率 P_n	气孔导度 G_s	胞间 CO ₂ 浓度 C_i	蒸腾速率 T_r	水分利用率 WUE	叶面积 Leaf area	叶鲜质量 Leaf fresh mass	叶干质量 Leaf dry mass	比叶重 Specific leaf mass	
净光合速率 P_n	1									
气孔导度 G_s	0.898**	1								
胞间 CO ₂ 浓度 C_i	0.328**	0.568**	1							
蒸腾速率 T_r	0.932**	0.950**	0.558**	1						
水分利用率 WUE	0.133	-0.140	-0.774**	-0.185	1					
叶面积 Leaf area	0.594**	0.600**	0.200	0.570**	0.059	1				
叶鲜质量 Leaf fresh mass	0.630**	0.615**	0.221	0.591**	0.062	0.893**	1			
叶干质量 Leaf dry mass	0.567**	0.580**	0.205	0.548**	0.064	0.893**	0.846**	1		
比叶重 Specific leaf mass	-0.068	-0.016	0.084	-0.038	-0.055	-0.075	-0.017	0.320**	1	

注:“*”和“**”分别表示 0.05 和 0.01 相关显著性水平。

Note:“*” and “**” mean significant level at 0.05 and 0.01.

2.3 高光效综合指标的筛选

采用主成分分析的结果见表 4,前 3 个因子

的累计贡献率达 86.88%,能够代表 9 项指标的大部分信息。9 项指标可分为叶片的光合性状指

标和物理性状指标,其中因子 1 解释的指标为净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、叶干质量;因子 2 解释的指标为胞间 CO₂ 浓度、水分利用率,因子 3 解释的指标为比叶重。光合性状指标中水分利用率为净光合速率与蒸腾速率的推导指标,水分利用率与胞间 CO₂ 浓度呈极显著相关($R = -0.774$),且胞间 CO₂ 浓度的权重高于水分利用率;物理性状指标中叶干质量与叶面积、叶鲜质量、比叶重呈极显著相关($R = 0.893, 0.846, 0.320$),且权重最低。因此,选用净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、比叶重 7 项指标作为枸杞高光效的综合评价指标。

根据主成分分析中各指标的贡献程度,构造出枸杞高光效评价指标的判断矩阵(表 5)。各层单排序一致性检验结果 CR 分别为 0、0.028 3、0.046 2,层次总排序的一致性检验结果 CR 为 0.035 1,均小于 0.1(表 6),因此认为层次总排序具有满意的一致性,蒸腾速率、比叶重、叶鲜质量、气孔导度、叶面积、净光合速率、胞间 CO₂ 浓度的权重值依次为 0.238 9、0.206 3、0.163 7、0.146 8、

0.129 9、0.089 6、0.024 6(表 7)。可见蒸腾速率、比叶重对枸杞高光效特性的贡献最大,其次是叶鲜质量、气孔导度、叶面积,而净光合速率、胞间 CO₂ 浓度的影响较小。

表 4 各项指标旋转后的因子载荷值

Table 4 Factor loading value after rotation of each index			
指标 Index	因子 1 Component1	因子 2 Component2	因子 3 Component3
净光合速率 P_n	0.875	0.130	-0.269
气孔导度 G_s	0.842	0.392	-0.186
胞间 CO ₂ 浓度 C_i	0.277	0.922	0.024
蒸腾速率 T_r	0.826	0.417	-0.224
水分利用率 WUE	0.132	-0.908	-0.110
叶面积 Leaf area	0.890	-0.086	0.129
叶鲜质量 Leaf fresh mass	0.892	-0.064	0.140
叶干质量 Leaf dry mass	0.859	-0.056	0.459
比叶重 Specific leaf mass	-0.005	0.110	0.885
特征根 Eigen value	4.575	2.045	1.199
累计贡献率/% Cumulative	50.84	73.55	86.88

表 5 枸杞光合能力评价因子的分层结构

Table 5 Layed structure of evaluation factors for photosynthetic capacity							
目标层 Target layer	高光效(A) High photosynthetic efficiency						
	光合性状(B1) Photosynthetic character				物理性状(B2) Physical character		
	净光合速率 P_n	气孔导度 G_s	胞间 CO ₂ 浓度 C_i	蒸腾速率 T_r	叶面积 Leaf area	叶鲜质量 Leaf fresh mass	比叶重 Specific leaf weight
约束层 Restraint layer							
指标层 Index layer	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7

表 6 层次结构的判断矩阵及一致性检验

Table 6 Judgement matrix and its consistency check of layed structure											
A	B1	B2	B1	C1	C2	C3	C4	B2	C5	C6	C7
B1	1	1	C1	1	1/2	5	1/3	C5	1	1	1/2
B2	1	1	C2	2	1	6	1/2	C6	1	1	1
			C3	1/5	1/6	1	1/7	C7	2	1	1
			C4	3	2	7	1				
CR=0.000				CR=0.028 3				CR=0.046 2			

2.4 枸杞光合能力的综合评价

利用筛选出的指标对枸杞种质进行 K-均值聚类分析(表 8),将 76 份枸杞材料分为三大类,第 I 大类包括‘16-1-3-5’‘14-26-6’‘14-87’等 6 个枸杞品种(系),该类群的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量低,比叶重高;第 II 大类包括‘宁杞 1 号’‘大麻叶’

‘宁杞 5 号’等 51 个枸杞品种(系),该类群的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量中等,比叶重低;第 III 大类包括‘Z44’‘14-2-3-20’‘13-19’等 19 个枸杞品种(系),该类群的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量高,比叶重中等。

表 7 指标层对目标层的权重值
Table 7 Weight value of evaluation factors

约束层 Restraint layer	层次 B 对层次 A Level B versus level A	指标层 Index layer	层次 C 对层次 B Level C versus level B	层次 C 对层次 A Level C versus level A	排名 Ranking
B1	0.5	C1	0.179 3	0.089 6	6
		C2	0.293 7	0.146 8	4
		C3	0.049 3	0.024 6	7
		C4	0.477 7	0.238 9	1
B2	0.5	C5	0.259 9	0.129 9	5
		C6	0.327 4	0.163 7	3
		C7	0.412 5	0.206 3	2

CR=0.035 1

表 8 不同品种(系)枸杞的聚类结果($\bar{x} \pm s$)
Table 8 Clustering results of different varieties of wolfberry

类群 Group	个数 Number	品种编号 Code	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) P_n	气孔导度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) C_i	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r	叶面积/ mm^2 Leaf area	叶鲜质量/g Leaf fresh mass	比叶重/ ($\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2}$) Specific leaf mass
I	6	25、26、33、43、70、73	12.1±1.7 a	258.2±33.4 a	318.4±11.2 a	4.9±0.7 a	264.7±65.2 a	0.19±0.07 a	0.26±0.04 b
II	51	1-7、10-17、19-24、27-32、 34-41、44-49、51-53、60、 67、71、72、74、75、76	14.1±3.6 a	280.8±76.0 a	321.5±19.4 a	5.8±1.4 a	290.0±56.4 a	0.22±0.06 a	0.17±0.02 a
III	19	8、9、18、42、50、54-59、 61-66、68、69	22.0±2.8 b	494.5±74.1 b	340.0±14.4 b	8.8±0.9 b	424.1±73.7 b	0.38±0.11 b	0.18±0.03 a

注:同列数据中小写字母表示 0.05 水平上差异。
Note:Different lowercase letters within the same columns indicate differences at 0.05 level.

为检验聚类结果是否可靠,利用聚类结果进行逐步判别分析,有 3 个变量最终引入判别函数,剔除了 4 个变量,得到判别函数如下:

$$Y_1 = -2.971 + 0.010X_1 + 7.146X_2 - 12.624X_3$$
$$Y_2 = -8.467 + 0.002X_1 + 0.933X_2 + 40.901X_3$$

其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别代表气孔导度、比叶重、叶鲜质量。根据判别函数对聚类结果重新进行分类,结果只有 1 个品种被误判,‘宁杞 7 号’由原来的 3 类误判为 2 类,总误判率为 1.32%,判对的概率为 98.68%。从图 1 也可得出,判别函数可将 3 个类群明显地区分开。聚类分析与判别分析的结果比较一致,因此认为对 76 份枸杞材料的分类结果是可靠的。

3 讨论

光合作用是一个非常复杂的生理过程,植物光合性状的差异与其自身的遗传特性、植物学特征及外界生理生态环境的影响有关^[26]。高光效育种研究最初是以理想株型指标为种质筛选的重要依据,随着研究的深入,逐步将光合气体交换参

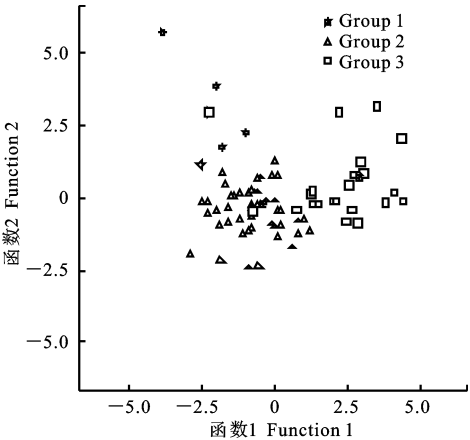


图 1 不同类群枸杞的典型判别得分图
Fig. 1 Scatter plot of canonical discriminant scores of different groups of wolfberry

数、光合酶含量等光合功能的相关生理指标作为高光效筛选的指标^[4]。有研究表明,光合速率是一个相对稳定的遗传性状^[27-28],比叶重是反映叶片质量,衡量植物相对生长速率的重要参数,与叶绿素含量、光合功能等相关联^[29-32]。本试验中品种和年份对枸杞光合气体交换参数及叶片形态指标有一定的影响,方差分析表明品种因素对净光合速率、气孔导度、叶面积等 9 个指标的影响显

著,年际因素对除了叶鲜质量外的 8 个指标影响显著。

近年来,针对不同作物某一性状的评价主要采用多个指标、多种统计方法相结合的方式综合评价,从而更加全面地反映某一性状的差异,同时也能筛选出与该性状相关的生长及生理生化指标^[33-34]。常用评价方法中主成分分析法是能在较多的性状指标中筛选出重点指标,但如果单用主成分分析法,数据可能会出现主要信息丢失和不重要指标凸显的现象^[35]。而层次分析法是采用定性与定量相结合的方法,可以较好地解决指标相互关联的问题,在植物种质资源评价和品种筛选中已广泛应用^[36]。但层次分析法的评价指标权重的确定带有一定的主观性,不同人所构造的判断矩阵可能会有一定差异。因此将主成分分析法和层次分析法结合起来应用,可将评价问题做的更科学、合理^[37]。本试验以国家枸杞工程技术研究中心收集与创制的优良品系为试材,对枸杞的光合气体交换参数和叶片物理性状参数共 9 个指标进行主成分分析,提取到 3 个主成分,累计贡献率达 86.88%,具有代表性,结合相关性分析最终筛选出净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、比叶重作为枸杞高光效的评价指标,运用层级分析法对主成分分析法确定指标权重的计算及排序,其中权重值最大的指标是蒸腾速率、比叶重,其次是叶鲜质量、气孔导度、叶面积,而净光合速率、胞间 CO₂ 浓度的最小,得出的结果满足一致性。在此基础上,对参试材料进行了聚类分析,并利用判别函数对聚类结果进行验证。

本试验通过聚类分析将 76 份材料分为 3 类型,其中有 6 个为第 I 类型(低光效),占供试材料的 7.9%,有 51 个为第 II 类型(中等光效),占供试材料的 67.1%,有 19 个为第 III 类型(高光效型),占供试材料的 25%,高光效类群的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量均显著高于低光效类群与中等光效的类群。结合大豆水稻^[38]等作物的高光效育种实践,本试验仅以光合气体交换参数和叶片物理性状等指标建立的枸杞高光效评价方法,缺乏光合作用中关键酶、群体光合、产量等指标的验证。笔者认为通过本文建立的方法虽不能够完全真实可靠的评价枸杞种质的光合能力,但可以作为枸杞高光效种质的初筛依据。

4 结 论

本研究调查的 76 份枸杞种质在光合气体交换参数与叶片物理性状指标上表现出较大差异;综合相关性分析与主成分分析,筛选出净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶面积、叶鲜质量、比叶重可作为枸杞高光效的评价指标;聚类分析将 76 份材料分为 3 个类群,其中 6 个低光效型,51 个中等光效型,19 个高光效型。本研究建立的枸杞高光效评价方法可为枸杞品种选育提供参考依据。

参考文献 Reference:

- [1] 钱 丹,赵振宇,马 帅,等.我国枸杞的国际贸易情况及问题分析[J].中国中药杂志,2019,44(13):2880-2885.
QIAN D,ZHAO ZH Y,MA SH,*et al.* Analysis of characteristics and problems of international trade of wolfberry in China[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019,44(13):2880-2885.
- [2] 安 巍,赵建华,尹 跃,等.枸杞种质资源研究现状及发展方向[J].宁夏农林科技,2019,60(9):49-50,99.
AN W,ZHAO J H,YIN Y,*et al.* Research status and development trend of wolfberry germplasm resources[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2019,60(9):49-50,99.
- [3] 茹振钢,冯素伟,李 淦.黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J].中国农业科学,2015,48(17):3388-3393.
RU ZH G,FENG S W,LI G. High-yield potential and effective ways of wheat in yellow huairiver valley facultative winter wheat region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17):3388-3393.
- [4] 张耀文,赵小光,关周博,等.作物高光效种质筛选的研究进展[J].中国农学通报,2019,35(18):1-11.
ZHANG Y W,ZHAO X G,GUAN ZH B,*et al.* Progress of high photosynthetic efficiency germplasm screening of crop[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019,35(18): 1-11.
- [5] 向珣朝,李 平,何立斌,等.超高产水稻的高光效特性和高光效材料的筛选[J].中国农学通报,2005,21(1):81-84, 119.
XIANG X CH,LI P,HE L B,*et al.* The high photosynthetic efficiency characters of super-high-yield rice and its screening[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(1):81-84,119.
- [6] 屠曾平.水稻光合特性研究与高光效育种[J].中国农业科学,1997,30(3):28-35.
TU C P. Studies on the photosynthetic characteristics of rice and breeding for high use efficiency of solar energy[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997,30(3):28-35.
- [7] 郝乃斌,戈巧英,张桂茹,等.高光效大豆几项光合生理指标

- 的研究[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 697-700.
- HAO N B, GE Q Y, ZHANG G R, *et al.* Photosynthetic characteristics of soybean cultivars with high photosynthetic efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 697-700.
- [8] DU W G, GE Q Y, ZHANG G R, *et al.* Progress in the breeding of soybean for high photosynthetic efficiency[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002(3): 253-258.
- [9] ZHOU X S, WU D X, SHEN S Q, *et al.* High photosynthetic efficiency of a rice (*Oryza sativa* L.) xantha mutant [J]. *International Journal for Photosynthesis Research*, 2006, 44(2): 316-319.
- [10] 屠曾平. 单叶光合速率与高光效育种[J]. 中国农业科学, 1979(2): 19-28.
- TU C P. Research of leaf photosynthetic rate and breeding with high photosynthetic efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1979(2): 19-28.
- [11] 屠曾平, 林秀珍, 蔡惟涓, 等. 水稻高光效育种的再探索图版 I [J]. 植物学报, 1995(8): 641-651, 671.
- TU C P, LIN X ZH, CAI W J, *et al.* Reprobing into rice breeding for high photosynthetic efficiency[J]. *Bulletin of Botany*, 1995(8): 641-651, 671.
- [12] 张桂茹, 满为群, 陈 怡, 等. 大豆高光效品种(种质)选育及高光效育种再探讨[J]. 大豆科学, 2001, 20(2): 110-115.
- ZHANG G R, MAN W Q, CHEN Y, *et al.* Development of soybean cultivars (germplasm) with high photosynthetic efficiency(HPE) and rediscussion of breeding for HPE [J]. *Soybean Science*, 2001, 20(2): 110-115.
- [13] 杜维广, 郝乃斌. 大豆高光效育种的研究获得新进展[J]. 大豆科学, 1990(4): 277.
- DU W G, HAO N B. New progress in the breeding of soybean for high photosynthetic efficiency[J]. *Soybean Science*, 1990(4): 277.
- [14] 杜维广, 王育民, 谭克辉. 大豆品种(系)间光合活性的差异及其与产量的关系[J]. 作物学报, 1982, 8(2): 131-135.
- DU W G, WANG Y M, TAN K H. Varietal difference in Photosynthetic activity of soybean and its relation to yield [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1982, 8(2): 131-135.
- [15] 杜维广, 盖钧镒. 大豆超高产育种研究进展的讨论[J]. 土壤与作物, 2014, 3(3): 81-92.
- DU W G, GAI J Y. A Discussion on advances in breeding for super high-yielding soybean cultivars[J]. *Soils and Crops*, 2014, 3(3): 81-92.
- [16] 郝乃斌, 戈巧英, 张玉竹, 等. 高光效大豆光合特性的研究 [J]. 大豆科学, 1989, 8(3): 283-287.
- HAO N B, GE Q Y, ZHANG Y ZH, *et al.* Studies the photosynthetic properties of soybean with photosynthetic efficiency[J]. *Soybean Science*, 1989, 8(3): 283-287.
- [17] 牛 宁, 李振侠, 金素娟, 等. 黄淮海地区大豆光合特性及高光效种质筛选[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(4): 524-532.
- NIU N, LI ZH X, JIN S J, *et al.* Comparison of photosynthetic gas exchange parameters for 150 soybean germplasm from Huanghuaihai Region[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(4): 524-532.
- [18] 张 华, 罗 俊, 吕建林, 等. 甘蔗不同品种光合特性比较及其聚类分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1562-1569.
- ZHANG H, LUO J, LÜ J L, *et al.* Comparison and cluster analysis of photosynthetic characters of different sugarcane varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1562-1569.
- [19] 张耀文, 侯君利, 赵小光, 等. 油菜高光效种质综合鉴定指标体系与方法[J]. 作物杂志, 2019(4): 69-76, 204.
- ZHANG Y W, HOU J L, ZHAO X G, *et al.* Comprehensive identification and selection system and method for rape germplasm with high photosynthetic efficiency[J]. *Crops*, 2019(4): 69-76, 204.
- [20] 段淋渊, 华 楠, 何昕孺, 等. 枸杞光合作用的研究进展. 宁夏农林科技, 2018, 59(6): 19-21.
- DUAN L Y, HUA N, HE X R, *et al.* Research progress in photosynthesis of wolfberry[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(6): 19-21.
- [21] 张晓娜, 王有科, 李捷, 等. 9 个枸杞品种叶光合气体交换参数与果实品质的对比分析[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(2): 148-152.
- ZHANG X N, WANG Y K, LI J, *et al.* Comparisons of photosynthetic parameters of leaf gas exchange and fruit quality among nine *Lycium barbarum* L cultivars [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2014, 32(2): 148-152.
- [22] 杨 娟, 王有科, 李 捷, 等. 不同枸杞品种叶绿素荧光参数差异分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 550-555.
- YANG J, WANG Y K, LI J, *et al.* Parameter difference of chlorophyll fluorescence in leaves of different cultivars of *Lycium barbarum* [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3): 550-555.
- [23] 秦 垦, 吴广生, 王 俊, 等. 两个宁夏枸杞品种叶片的解剖比较研究[J]. 宁夏农林科技, 2006(1): 9-10.
- QIN K, WU G SH, WANG J, *et al.* Comparison leaf anatomy of two cultivars of *Lycium barbarum* [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2006(1): 9-10.
- [24] GONG H G, REHMAN F, YANG T S, *et al.* Construction of the first high-density genetic map and QTL mapping for photosynthetic traits in *Lycium barbarum* [J]. *Molecular Breeding*, 2019, 39(7).
- [25] 何昕孺, 王琴平, 秦 垦, 等. 枸杞不同品系的光合特性及光响应模型拟合研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 57-62.
- HE X R, WANG Q P, QIN K, *et al.* Photosynthetic characteristics and light response model fitting of wolfberry

- [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(28): 57-62.
- [26] 许大全. 光合作用学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 187-267.
- XU D Q. Photosynthesis [M]. Beijing: The Science Press, 2013: 187-267.
- [27] 冯国郡, 章建新, 李宏琪, 等. 甜高粱高光效种质的筛选和生理生化指标的比较[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 260-268, 277.
- FENG G J, ZHANG J X, LI H Q, *et al.* Selection of high photosynthetic efficiency germplasm and comparative analysis of physiological indexes of sweet *Sorghum* [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, 35(3): 260-268, 277.
- [28] ZHAO M. Selecting and characterizing high-photosynthesis plants of *O. sativa* × *O. rufipogon* progenies-in: rice science for a better world[C]. Manila: 4th Conference of the Asian Crop Science Association, 2001: 24-27.
- [29] 程建峰, 陈根云, 沈允钢. 植物叶片特征与光合性能的关系. 中国生态农业学报[J]. 2012, 20(4): 466-473.
- CHENG J F, CHEN G Y, SHEN Y G. Relational analysis of leaf characteristics and photosynthetic capacities of plants[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 466-473.
- [30] LAMBERS H, POORTER H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences[J]. *Advances in Ecological Research*, 1992, 23: 187-261.
- [31] NIINEMETSÜ. Components of leaf dry mass per area-thickness and density-alter leaf photosynthetic capacity in reversedirections in woody plant[J]. *New Phytologist*, 1999, 144(1): 35-47.
- [32] YAMASHITA N, KOIKE N, ISHIDA A. Leaf ontogenetic independence of light acclimation in invasive and native-subtropical trees of different successional status[J]. *Plant Cell Environment*, 2002, 25(10): 1341-1356.
- [33] 吴豪, 黄园园, 汪辉, 等. 长江中下游地区小麦品种籽粒和面条品质分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2193-2207.
- WU H, HUANG Y Y, WANG H, *et al.* Comprehensive analysis on grain and processing quality of several wheat varieties in the middle and lower reacher of Yangtze River [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(13): 2193-2207.
- [34] 庞强强, 周曼, 孙晓东, 等. 不同菜心品种萌发期和苗期耐热性分析及其鉴定指标筛选[J]. 西北农业学报, 2020, 29(2): 295-305.
- PANG Q Q, ZHOU M, SUN X D, *et al.* Comprehensive evaluation and indexes screening of heat tolerance at germination and seedling stages in different cultivars of Chinese flowering cabbage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(2): 295-305.
- [35] 王嗣超, 张丰, 关明雨. 一种结合层次分析法的改进型主成分评价法及其应用[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2014, 17(3): 27-29, 44.
- WANG S CH, ZHANG F, GUANG M Y. An improved major component assessment and its application incorporating analytic hierarchy process[J]. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 2014, 17(3): 27-29, 44.
- [36] 王晓斌, 王瀚, 胡开明, 等. 基于层次分析法和 GGE 双标图对引进马铃薯种质资源的综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(6): 1067-1078.
- WANG X B, WANG H, HU K M, *et al.* Comprehensive evaluation of introduced potato germplasms resources based on the analytical hierarchy process and GGE-biplot [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(6): 1067-1078.
- [37] 张秀红, 马迎雪, 李延晖. 结合主成分分析法改进后的层次分析法及应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(4): 30-32, 39.
- ZHANG X H, MA Y X, LI Y H. Combined with principal component analysis improved analytic hierarchy process and its application[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2013, 10(4): 30-32, 39.
- [38] 牛丽芳, 路铁刚, 林浩. 水稻高光效育种研究进展[J]. 生物技术进展, 2014, 4(3): 153-157.
- NIU L F, LU T G, LIN H. Progress of high photosynthesis efficiency rice breeding[J]. *Progress in Biotechnology*, 2014, 4(3): 153-157.

Evaluation of Photosynthetic Characteristics and Screening of High Photosynthetic Efficiency Indexes of *Lycium barbarum*

HE Xinru, WANG Yujing, LI Yanying, ZHANG Bo, HUANG Ting, YIN Yue,
DUAN Linyuan, QIN Ken and DAI Guoli

(National Wolfberry Engineering Research Center/Institute of Wolfberry Science, Ningxia Academy of
Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract Photosynthetic characteristics of *Lycium barbarum* germplasm were comprehensively evaluated to screen out germplasm with high photosynthetic efficiency, which is expected to provide reference for breeding of *Lycium barbarum*. In the field experiment, the photosynthetic gas exchange parameters and leaf physical characters of 76 *Lycium barbarum* materials had been measured for two consecutive years. The principal component analysis, analytic hierarchy process and cluster analysis methods were used to evaluate the photosynthetic capacity and physical character of leaves. The results showed that there were significant differences among net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, water use efficiency, leaf area, fresh leaf mass and dry leaf mass. The coefficient of variation of stomatal conductance, leaf fresh mass, leaf dry mass, specific leaf mass and leaf area was 46.3%—57.6%. The coefficient of variation of intercellular CO₂ concentration and water use efficiency was small, which ranged from 10.9% to 27.4%. Three principal components were obtained by using principal component analysis, and the cumulative contribution rate was 86.88%, which was representative. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, leaf area, leaf fresh mass and specific leaf weight were selected as evaluation indexes. The order of weight values obtained by AHP was transpiration rate>specific leaf weight>leaf fresh mass>stomatal conductance>leaf area>net photosynthetic rate>intercellular CO₂ concentration. 76 materials were divided into three types which included 6 ones with low photosynthetic efficiency type, 51 ones with medium photosynthetic efficiency type and 19 ones with high photosynthetic efficiency type by cluster analysis. The discriminant analysis was used to reclassify the clustering results, and only one material was misjudged. The total misjudgment rate was 1.32%, and the probability of correct judgment was 98.68%. The classification results were reliable, can provide materials for subsequent breeding of new varieties.

Key words *Lycium barbarum*; High photosynthetic efficiency; Screen indicator; Comprehensive evaluation

Received 2021-09-15

Returned 2021-12-06

Foundation item The Natural Science Foundation of Ningxia(No. 2020AAC03288); The Enhancement Project for Platform of Science and Technology Construction of Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences(No. NKYP-19-13); The Special Project for Agricultural Breeding of Ningxia Hui Autonomous Region(No. 2018NYYZ0102).

First author HE Xinru, female, master, assistant research fellow. Research area: *Lycium barbarum* breeding and cultivation. E-mail: hhxinru@163.com

Corresponding author DAI Guoli, male, master, associate research fellow. Research area: *Lycium barbarum* breeding. E-mail: dgl2006swfc@163.com

(责任编辑:成 敏 Responsible editor: CHENG Min)