

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.004

吕长文, 蒋亚, 张凯, 等. 基于农艺性状与光合特性的甘薯耐荫性评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 32-42.

基于农艺性状与光合特性的甘薯耐荫性评价

吕长文¹, 蒋亚², 张凯¹, 唐道彬¹, 王季春¹

1. 西南大学 农学与生物科技学院/薯类生物学与遗传育种重庆市重点实验室, 重庆 400715;

2. 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550006

摘要: 为探索更加合理的甘薯耐荫性评价方式, 通过人工遮荫, 研究弱光下 29 个不同甘薯品种(系)的农艺性状、光合指标、产量变化等, 并采用不同的评价分类方式对其进行耐荫性评价. 结果表明: 不同品种(系)在同一单项指标下的耐荫系数不同, 同一品种(系)的不同单项指标耐荫系数也存在差异, 其中以气孔导度、净光合速率、非光化学猝灭系数和蒸腾速率等光合指标的变异系数较大, 分别为 69.07%, 67.55%, 61.91% 和 49.99%; 茎干质量、蔓长、叶面积指数及分枝数的变异系数中等, 分别为 28.70%, 24.90%, 24.84% 及 24.13%. 以茎干质量、净光合速率或非光化学猝灭系数等单项指标评价分类结果与产量减幅规律不符, 而采用主成分分析、隶属函数分析和聚类分析等方法进行耐荫性综合评价结果更加可靠.

关键词: 甘薯; 农艺性状; 光合特性; 耐荫系数; 评价

中图分类号: S531 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)10-0032-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Evaluation of Shade Tolerance Based on Agronomic Traits and Photosynthetic Characteristics in Sweetpotato

LYU Changwen¹, JIANG Ya², ZHANG Kai¹,
TANG Daobin¹, WANG Jichun¹

1. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University/Key Laboratory of Biology and Genetic Breeding for Tuber and Root Crops in Chongqing, Chongqing 400715, China;

2. Institute of Soil and Fertilizer in Guizhou, Guiyang 550006, China

Abstract: In order to explore a reasonable evaluation method of shade tolerance of sweetpotato, 29 different sweetpotato cultivars (lines) were monitored under the circumstance of artificial shade to research the changes on their agronomic traits, photosynthetic characteristics and yield, and evaluate their shade toler-

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 重庆市科技计划项目(cstc2019jcsx-msxmX0326); 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2021F001); 重庆市现代农业产业体系创新团队项目(CQMAITS202303-3).

作者简介: 吕长文, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事薯类作物栽培研究.

通信作者: 王季春, 教授, 博士研究生导师.

ance coefficient through different methods. The results indicated that the shade tolerance coefficient of different cultivars (lines) was different with the same index, and the coefficients of different indexes were different with the same variety (line). The variation coefficients of stomatal conductance, net photosynthetic rate (Pn), non-photochemical quenching coefficient (NPQ) and transpiration rate were relatively larger at 69.07%, 67.55%, 61.91% and 49.99%, respectively. The variation coefficients of stem dry weight, vine length, leaf area index and number of branches were medium at 28.70%, 24.90%, 24.84% and 24.13%, respectively. The evaluation results of classification using single index such as Pn or NPQ were inconsistent with the reduction ranges of sweetpotato yield, while comprehensive evaluation was more reliable with these methods, such as principal component, subordinate function and clustering analysis.

Key words: sweetpotato; agronomic traits; photosynthetic characteristics; shade tolerance coefficient; evaluation

作物对弱光、高温、干旱、盐碱等逆境胁迫会做出不同的响应, 从而表现出避逆、抗逆、御逆等适应性特点^[1-3], 如作物通过改变其形态、生理生化过程等性状来适应弱光环境, 在长期的适应过程中, 作物会表现出一定的耐荫性. 植物的耐荫性是指植物在弱光照条件下的生活能力, 是植物为适应低光量子密度、维持自身系统平衡、保持生命活动正常进行而产生的一系列变化, 如丙二醛、可溶性糖和可溶性蛋白等发生变化, 通过降低光饱和点、净光合速率并提高光能利用率而增强其生长能力等^[4-6].

目前, 有关作物耐荫性的研究较多, 评价方法各异, 评价结果差异较大. 陈怀珠等^[7]以综合耐荫系数为指标对 34 份春大豆品种的 13 个性状进行耐荫性评定, 最终筛选出结荚期的生物产量、收获期株高、最低底荚高度、单株荚数、单株粒数、单株粒质量和百粒质量等 7 个耐荫性鉴定指标性状. 李春红等^[8]以 14 个指标的耐荫系数对 30 份大豆进行耐荫性评价, 最后确定以主茎节数、分枝数、节间长度、抗倒性、单株荚数、百粒质量和单株粒质量等指标作为耐荫性鉴定指标, 并将不同的品(系)分为高度耐荫、中度耐荫和不耐荫 3 类. 武晓玲等^[9]则将叶片干质量、气孔导度、株高和暗下最大荧光产量作为快速判断大豆耐荫性的鉴定指标. 还有对马铃薯、黄瓜、玉米、番茄等作物的研究^[10-13], 如通过各指标的耐荫指数和耐荫系数对 10 个马铃薯品种的耐荫性进行研究, 筛选出叶面积、单株块茎质量、叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素胁迫指数用于评价马铃薯的耐荫性^[10]. 除采用农艺性状、产量及其构成因素等指标作为作物耐荫性指标外, 也有研究者通过叶绿素含量及抗逆物质等指标对作物耐荫性进行评价. 如刘钟等^[14]对马铃薯的耐荫性采用隶属函数的平均值进行评价, 研究结果将叶绿素 a、叶绿素 b、过氧化物酶、丙二醛、脯氨酸、相对电导率、超氧化物歧化酶和过氧化物酶作为衡量马铃薯的耐荫性指标.

甘薯作为我国重要的粮食、蔬菜和饲料作物, 同时也是淀粉工业的重要原料和新型能源作物^[15-16], 在西南地区多以甘薯与玉米套作进行种植. 作为低位作物的甘薯, 共生期受玉米遮荫的影响较大进而造成不耐荫甘薯生长发育受限而大幅减产. 目前有关甘薯耐荫性评价的研究较少, 林先明等^[17]利用灰色关联度分析方法对 7 个甘薯品种的 8 个主要农艺性状与鲜薯产量的关系进行了分析, 结果表明成薯率、单薯质量、成薯数及分枝数是重要的选择指标. 此种方法筛选出了对甘薯鲜薯产量的影响指标, 但指标类型较单一, 未考虑光合及抗性生理等指标对甘薯鲜产的影响. 因此采用合理的指标体系对不同甘薯进行耐荫性评价分类, 对于耐荫性甘薯品种筛选及其在间套作甘薯区进行应用具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

在前期对 300 余份来自西南地区和其他省区市的甘薯种质的遗传背景和产量品质的初步评价基础上, 选择在重庆本地产量表现相对较好的 29 份甘薯品种(系)作为供试材料(表 1), 种植于西南大学薯类作物研究所歇马基地(106°21'E, 29°46'N)人工修筑的水泥槽中. 该地属亚热带季风性湿润气候, 平均气温 18.2 °C, 无霜期 340~350 d, 年降水量为 1 000~1 450 mm, 年蒸发量为 1 200~1 500 mm. 经

测试, 水泥槽中土壤类型与肥力均一, pH 值为 6.6, 有机质 10.6 g/kg, 全氮 0.5 g/kg, 全磷 1.2 g/kg, 全钾 42.8 g/kg, 速效钾 165.5 mg/kg, 有效磷 18.7 mg/kg, 碱解氮 80.3 mg/kg.

1.2 试验设计与方法

采用完全随机区组试验设计, 设置 70% 遮光处理(T)和自然光处理的对照(CK). 栽后立即采用黑色遮阳网遮荫, 遮阳网离地高度 1.8 m, 进行遮荫处理并持续 60 d, 每个甘薯品种(系)种植 4 行, 每行 6 株, 株距 0.28 m, 行距 0.62 m, 3 次重复. 栽后 60 d(块根膨大期)测定其农艺性状、光合和叶绿素荧光等指标, 并于栽后 150 d 以每个品种(系)中间两行收获块根并测产.

1.3 农艺性状与产量测定

茎粗: 用游标卡尺测定距离主茎基部 10 cm 处直径.

最长蔓长: 用卷尺测定甘薯主茎基部到顶部生长点的垂直距离.

分枝数: 直接用计数法测量茎基部 30 cm 以内长度大于 10 cm 的分枝.

叶面积指数(LAI): 采用打孔称质量法测定. 用打孔器打取一定面积的甘薯叶片, 其面积和鲜质量分别为 S_1 , M_1 , 单株叶片总鲜质量为 M , 总叶面积为 S , 根据公式求得 S , 再根据小区面积换算叶面积指数.

$$M_1/S_1 = M/S$$

产量: 于栽后 150 d 以每个品种(系)中间两行收获块根记产.

1.4 色素与光合特性及叶绿素荧光参数测定

叶绿素和类胡萝卜素测定: 采用浸提法^[18], 称取 0.1 g 新鲜叶片放入离心管中, 加入 15 mL 提取液(丙酮、无水乙醇和水的比例为 4.5 : 4.5 : 1)混匀, 放在黑暗条件下浸提 48 h, 在 663 nm, 645 nm 和 470 nm 波长下以提取液为空白调零进行比色, 最后计算叶绿素 a(chla)、叶绿素 b(chlb)、总叶绿素(chl)及胡萝卜素(car)的质量分数.

光合特性测定: 每个处理选择 3 株生长正常且长势一致的甘薯植株, 在晴朗无风的上午 9:00—11:00 用 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR Biosciences 公司)测定其功能叶片(倒 4 叶)的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r). 测定时, 仪器光照强度及 CO_2 浓度参数分别设定为 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $380\ \mu\text{mol}/\text{mol}$.

叶绿素荧光参数测定: 使用便携式调制叶绿素荧光仪 MINI-PAM-II(德国 WALZ 公司)进行测定. 标记测定光合后的植株, 暗适应 30 min 后, 设定光化光强度为 $190\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 测定叶片(倒 4 叶)非光化学猝灭系数(NPQ)、光化学猝灭系数(qP)以及 PSII 实际量子产量(Φ_{PSII}).

1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据录入、整理及作图, 采用 DPS 7.05 软件对数据进行主成分分析、聚类分析(欧式距离离差平方和法). 采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析和差异显著性检验. 参照谢志坚^[19]的评价方法计算相关指标:

$$C_{ST} = M/CK$$

式中, C_{ST} 为耐荫系数(shade tolerance coefficient, STC, 以 C_{ST} 表示), M 表示不同遮荫处理下的平均测定值, CK 为对照测定值.

$$R_R = (M - CK)/CK \times 100\%$$

式中, R_R 为减幅(range of reduction, RR, 以 R_R 表示).

各参试材料综合指标的隶属函数值(u):

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min})$$

式中, $j = 1, 2, \dots, n$, X_j 表示第 j 个综合指标; X_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小值; X_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值.

各综合指标权重(W):

$$W_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的权重, P_j 表示经主成分分析所得各甘薯材料第 j 个综

合指标的贡献率.

不同甘薯品种(系)综合评价价值(D):

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j]$$

2 结果与分析

2.1 甘薯各单项指标的耐荫系数及相关性分析

根据甘薯块根膨大期各指标的耐荫系数可知(表 1), 气孔导度(G_s)、净光合速率(P_n)、非光化学猝灭系数(NPQ)和蒸腾速率(Tr)变异系数大, 分别为 69.07%, 67.55%, 61.91% 和 49.99%; 茎干质量(DWS)、蔓长(VL)、叶面积指数(LAI)及分枝数(NB)的变异系数较大, 分别为 28.70%, 24.90%, 24.84% 及 24.13%, 说明弱光胁迫对 G_s , P_n , NPQ , Tr , DWS , VL , LAI 及 NB 的影响较大. 在遮荫处理下, 不同品种(系)在同一单项指标下的耐荫系数和同一品种(系)的不同单项指标耐荫系数的变化规律均不尽相同, VL , 节间数(NI), LAI , P_n , G_s , 胞间 CO_2 浓度(C_i)和 Tr 与对照相比总体上有所增高(耐荫系数 $STC > 1$), NB 与对照相比总体上有所降低($STC < 1$), DWS , $PSII$ 光化学量子效率(Φ_{PSII})、光化学猝灭系数(qP)和 NPQ 则在各品种(系)间表现不一致, 有些增加($STC > 1$), 有些降低($STC < 1$), 且变化幅度有所不同. 由此可见, 各单项指标对甘薯耐荫性影响所起的作用大小不一致.

表 1 甘薯块根膨大期各单项指标的耐荫系数(STC)

品种(系)	NB	VL	NI	DWS	LAI	P_n	G_s	C_i	Tr	Φ_{PSII}	qP	NPQ
渝苏 162	0.91	1.92	1.62	1.34	1.60	2.83	3.39	0.99	2.36	1.15	0.97	0.55
渝薯 12	0.88	1.75	1.65	1.40	1.78	2.60	3.78	1.09	3.11	1.11	0.88	0.60
徐薯 22	1.00	3.36	2.21	1.47	1.67	2.48	3.52	1.11	2.40	0.84	0.89	1.60
渝红心薯 46	0.70	1.82	1.20	1.00	0.98	1.44	1.86	0.92	1.33	0.87	0.99	1.57
渝薯 38	1.18	2.25	1.73	1.48	1.73	5.53	8.74	1.05	4.84	1.09	0.85	0.81
渝薯 198	0.83	2.11	1.60	1.66	1.96	1.93	2.67	1.07	1.88	0.96	0.95	0.86
1446-5	0.79	2.56	1.69	1.27	1.50	1.25	1.61	1.07	1.60	0.85	1.01	2.21
龙薯 9 号	0.78	2.95	1.23	1.81	1.58	1.53	2.30	1.17	1.98	0.89	0.92	0.73
渝薯 4 号	0.51	1.82	1.32	0.84	0.79	0.65	0.62	1.05	0.81	0.65	0.84	2.35
绵薯 6 号	0.61	1.35	1.48	0.73	0.96	1.15	1.37	0.99	1.02	0.87	0.84	1.25
渝薯 2 号	0.33	2.00	1.29	0.79	1.09	5.58	11.39	1.42	4.22	0.92	1.04	1.05
渝薯 11	0.67	1.73	1.45	0.91	1.25	5.68	9.63	1.23	4.25	1.05	0.87	2.18
渝薯 6 号	0.69	1.84	1.51	0.91	1.61	6.24	7.34	1.13	3.79	1.02	0.92	0.38
渝紫薯 2 号	0.89	2.36	1.73	1.37	1.55	1.69	3.71	1.47	2.05	0.97	0.99	1.28
南薯 88	0.83	2.30	1.50	1.42	1.47	1.96	1.94	1.15	1.12	0.60	1.02	2.74
渝薯 17	0.91	2.12	1.70	2.09	1.34	6.36	8.44	1.20	3.94	0.93	0.93	1.20
1386-4	1.28	2.99	2.19	1.58	1.48	2.86	8.03	1.74	2.62	0.80	0.88	1.89
渝紫香 10 号	0.92	1.49	1.17	0.96	1.58	2.23	3.39	1.23	1.39	0.85	1.27	3.81
渝红心薯 98	0.96	2.21	1.51	1.51	1.64	8.41	9.06	1.16	4.43	1.49	0.96	0.57
万薯 7 号	0.76	1.81	1.33	1.11	1.28	1.27	2.45	1.29	1.77	0.97	1.05	1.68
渝薯 15	1.15	1.79	1.49	1.47	1.82	2.95	2.36	1.02	1.75	1.11	1.08	0.43
13-3-19	0.85	1.50	1.27	0.94	1.02	6.40	6.21	1.05	3.23	1.34	1.04	0.80
宁紫薯 1 号	0.85	2.56	1.86	1.98	1.36	6.01	5.47	0.99	4.54	0.80	0.97	1.78
川紫薯 6 号	0.80	1.63	1.31	1.58	1.31	2.15	3.78	1.51	2.26	1.03	0.97	1.07

续表 1

品种(系)	NB	VL	NI	DWS	LAI	Pn	Gs	Ci	Tr	Φ_{PSII}	qP	NPQ
渝薯 50	0.78	1.60	1.22	1.55	1.45	3.06	3.36	1.06	2.06	1.10	1.00	0.71
渝薯 33	0.68	1.36	1.25	1.15	2.30	1.88	2.60	1.18	1.82	1.06	0.95	1.29
黔薯 8 号	0.72	1.51	1.24	0.78	1.04	0.93	1.14	1.14	1.27	0.76	1.01	3.12
南紫薯 018	0.54	1.65	1.32	1.00	0.74	5.54	8.39	1.17	4.48	1.54	1.06	0.42
渝紫薯 153	0.88	2.30	1.41	1.78	1.26	0.80	0.85	1.14	1.01	0.96	1.23	2.66
平均数	0.82	2.02	1.50	1.31	1.42	3.22	4.46	1.17	2.53	0.99	0.98	1.43
标准差	0.20	0.50	0.27	0.37	0.35	2.18	3.08	0.18	1.26	0.21	0.10	0.89
变异系数/%	24.13	24.90	18.05	28.70	24.84	67.55	69.07	15.22	49.99	21.59	10.40	61.91

注: NB 为分枝数, VL 为蔓长, NI 为节间数, DWS 为茎干质量, LAI 为叶面积指数, Pn 为净光合速率, Gs 为气孔导度, Ci 为胞间 CO₂ 浓度, Tr 为蒸腾速率, Φ_{PSII} 为 PSII 光化学量子效率, qP 为光化学猝灭系数, NPQ 为非光化学猝灭系数。

各单项指标耐荫系数的相关系数矩阵(表 2)表明, 除 Ci 外, 各单项指标均存在 1 个或 1 个以上与其显著或极显著相关的其他单项指标, 其中 NB, NI, DWS, Pn, Tr, Φ_{PSII} 和 NPQ 均有 4 个其他指标与之相关, 但不同指标间的相关性不一致。

表 2 甘薯块根膨大期各单项指标耐荫系数的相关系数矩阵

指标	NB	VL	NI	DWS	LAI	Pn	Gs	Ci	Tr	Φ_{PSII}	qP	NPQ
NB	1											
VL	0.44*	1										
NI	0.60**	0.72**	1									
DWS	0.58**	0.57**	0.45*	1								
LAI	0.51**	0.22	0.30	0.43*	1							
Pn	0.06	0.00	0.14	0.10	-0.02	1						
Gs	0.02	0.08	0.21	0.01	-0.06	0.87**	1					
Ci	0.13	0.22	0.21	0.07	0.02	0.00	0.36	1				
Tr	0.05	0.11	0.26	0.15	0.02	0.91**	0.91**	0.10	1			
Φ_{PSII}	0.05	-0.30	-0.17	-0.02	0.06	0.58**	0.46*	-0.08	0.54**	1		
qP	0.00	-0.20	-0.41*	-0.02	-0.07	-0.13	-0.19	0.03	-0.25	0.10	1	
NPQ	-0.04	0.03	-0.08	-0.19	-0.22	-0.44*	-0.35	0.12	-0.47**	-0.65**	0.38*	1

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义; NB 为分枝数, VL 为蔓长, NI 为节间数, DWS 为茎干质量, LAI 为叶面积指数, Pn 为净光合速率, Gs 为气孔导度, Ci 为胞间 CO₂ 浓度, Tr 为蒸腾速率, Φ_{PSII} 为 PSII 实际光化学量子效率, qP 为光化学猝灭系数, NPQ 为非光化学猝灭系数。

2.2 基于单项指标的耐荫性评价

从甘薯各指标的耐荫系数(表 1)及其相关系数矩阵(表 2)中选择变异系数和相关系数均较大的农艺性状、光合特性及荧光特性指标各 1 个, 即茎干质量(DWS)、净光合速率(Pn)和非光化学猝灭系数(qP), 对其耐荫系数分别进行聚类分析(表 3)。结果显示, 以茎干质量单项指标聚类, 29 个参试材料中, 龙薯 9 号、1386-4、宁紫薯 1 号和渝紫薯 153 属于强耐荫型; 渝苏 162、渝薯 12、渝薯 22、渝薯 198 等 13 个品种(系)属于中度耐荫型; 渝红心薯 46、渝薯 4 号等 12 个品种(系)属于不耐荫型。以净光合速率聚类发现, 强耐荫型包括渝薯 38、渝薯 2 号、渝薯 11、渝薯 6 号、1386-4、渝红心薯 98、宁紫薯 1 号、13-3-19 和南紫薯 018 共 9 个品种(系); 中度耐荫型包括渝苏 162、渝薯 12 等 11 个品种(系); 其余 9 个品种(系)则为不耐荫型。以非光化学猝灭系数聚类发现, 南薯 88、渝紫香 10 号、黔薯 8 号和渝紫薯 153 为强耐荫型; 徐 22、渝红心薯 46 等 8 个品种(系)为中度耐荫型; 渝苏 162、渝薯 12、渝薯 38、渝薯 198 等 17 个品种(系)为不耐荫型。从以上结果可看出, 采用不同单项指标评价结果差异较大, 同一品种在不同指标评价方式下, 除徐薯 22、绵薯 6 号和渝薯 17 外, 其余品种所属类别均不相同。

表 3 不同甘薯品种(系)单项指标耐荫系数聚类分析

品种(系)	农艺性状		光合特性		荧光特性	
	茎干质量	耐荫性	净光合速率	耐荫性	非光化学猝灭系数	耐荫性
渝苏 162	1.34	中度耐荫	2.83	中度耐荫	0.55	不耐荫
渝薯 12	1.40	中度耐荫	2.60	中度耐荫	0.60	不耐荫
徐薯 22	1.47	中度耐荫	2.48	中度耐荫	1.60	中度耐荫
渝红心薯 46	1.00	不耐荫	1.44	不耐荫	1.57	中度耐荫
渝薯 38	1.48	中度耐荫	5.53	强耐荫	0.81	不耐荫
渝薯 198	1.66	中度耐荫	1.93	中度耐荫	0.86	不耐荫
1446-5	1.27	中度耐荫	1.25	不耐荫	2.21	中度耐荫
龙薯 9 号	1.81	强耐荫	1.53	不耐荫	0.73	不耐荫
渝薯 4 号	0.84	不耐荫	0.65	不耐荫	2.35	中度耐荫
绵薯 6 号	0.73	不耐荫	1.15	不耐荫	1.25	不耐荫
渝薯 2 号	0.79	不耐荫	5.58	强耐荫	1.05	不耐荫
渝薯 11	0.91	不耐荫	5.68	强耐荫	2.18	中度耐荫
渝薯 6 号	0.91	不耐荫	6.24	强耐荫	0.38	不耐荫
渝紫薯 2 号	1.37	中度耐荫	1.69	不耐荫	1.28	不耐荫
南薯 88	1.42	中度耐荫	1.96	中度耐荫	2.74	强耐荫
1386-4	2.09	强耐荫	6.36	强耐荫	1.20	不耐荫
渝薯 17	1.58	中度耐荫	2.86	中度耐荫	1.89	中度耐荫
渝紫香 10 号	0.96	不耐荫	2.23	中度耐荫	3.81	强耐荫
渝红心薯 98	1.51	中度耐荫	8.41	强耐荫	0.57	不耐荫
万薯 7 号	1.11	不耐荫	1.27	不耐荫	1.68	中度耐荫
渝薯 15	1.47	中度耐荫	2.95	中度耐荫	0.43	不耐荫
13-3-19	0.94	不耐荫	6.40	强耐荫	0.80	不耐荫
宁紫薯 1 号	1.98	强耐荫	6.01	强耐荫	1.78	中度耐荫
川紫薯 6 号	1.58	中度耐荫	2.15	中度耐荫	1.07	不耐荫
渝薯 50	1.55	中度耐荫	3.06	中度耐荫	0.71	不耐荫
渝薯 33	1.15	不耐荫	1.88	中度耐荫	1.29	不耐荫
黔薯 8 号	0.78	不耐荫	0.93	不耐荫	3.12	强耐荫
南紫薯 018	1.00	不耐荫	5.54	强耐荫	0.42	不耐荫
渝紫薯 153	1.78	强耐荫	0.80	不耐荫	2.66	强耐荫

2.3 基于综合指标的耐荫性评价

2.3.1 主成分分析

主成分分析可以将多个彼此相关的单项指标转换成少数几个新的且彼此独立的综合指标. 以不同甘薯品种(系)各指标的耐荫系数为基础, 将 12 个单项指标进行主成分分析, 由表 4 可以看出, 主成分分析特征值中 5 个成分的贡献率分别为 31.32%, 24.48%, 12.30%, 10.28% 和 6.69%, 累计贡献率达到 85.07%, 即 5 个主成分解释了总变异的 85.07%, 具有较强的信息代表性. 因此将原来的 14 个单项指标转换为 5 个新的且相互独立的综合指标(comprehensive index, CI), 这 5 个主成分代表了原始指标携带的绝大部分信息, 可通过这 5 个主成分对甘薯耐荫性进行分析.

第 1 个主成分主要包括 3 个性状分量(Pn, Gs 和 Tr), 相当于 3.76 个原始指标的作用, 可反映总信息量的 31.32%.

第 2 个主成分主要包括 4 个性状分量(NB, VL, NI, DWS), 相当于 2.94 个原始指标的作用, 可反映

总信息量的 24.84%。

第 3 个主成分主要包括 3 个性状分量(LAI, Φ_{PSII} 和 NPQ), 相当于 1.48 个原始指标的作用, 可反映总信息量的 12.30%。

第 4 个主成分包括 1 个性状分量(qP), 相当于 1.23 个原始指标的作用, 可反映总信息量的 10.28%。

第 5 个主成分包括 1 个性状分量(Ci), 相当于 0.80 个原始指标的作用, 可反映总信息量的 6.69%。

表 4 各性状主成分的特征向量及贡献率

主成分	性状	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	CI ₅
特征值		3.76	2.94	1.48	1.23	0.80
贡献率/%		31.32	24.48	12.30	10.28	6.69
累计贡献率/%		31.32	55.80	68.10	78.38	85.07
	NB	0.18	0.40*	-0.21	0.25	0.01
	VL	0.16	0.44*	0.21	-0.06	0.24
	NI	0.25	0.41*	0.18	-0.19	0.07
	DWS	0.20	0.38*	-0.22	0.16	0.23
	LAI	0.13	0.29	-0.43*	0.10	-0.40
	Pn	0.43*	-0.22	0.07	0.10	0.27
	Gs	0.43*	-0.19	0.31	0.13	-0.03
	Ci	0.09	0.12	0.48	0.37	-0.69*
	Tr	0.46*	-0.17	0.13	0.02	0.17
	Φ_{PSII}	0.29	-0.30	-0.36*	0.19	-0.11
	qP	-0.18	-0.08	-0.12	0.76*	0.26
	NPQ	-0.32	0.14	0.38*	0.29	0.28

注: * 表示某指标在各因子中的最大绝对值。

2.3.2 隶属函数分析

对各个综合指标值进行隶属函数分析, 分别计算其隶属函数值(表 5), 如渝红心薯 98 对于其单个的综合指标 CI₁ 最大(3.87), 其隶属函数值 $u(X_1)$ 最大, 等于 1.00; 黔薯 8 号的 CI₁ 最小, 其隶属函数值也为最小(0.00)。由于这类综合指标主要反映甘薯的光合作用, 说明在此综合指标下, 渝红心薯 98 光合能力最强, 反之, 黔薯 8 号光合能力最弱。同理, 综合指标 CI₂ 主要反映甘薯地上部生长, 渝薯 17 在地上部生长方面表现为最耐荫, 南紫薯 018 则表现为不耐荫。以此类推, 渝薯 17、渝紫香 10 号和宁紫薯 1 号的隶属函数值均为 1.00, 分别为综合指标 CI₃, CI₄, CI₅ 下最耐荫的品种, 而渝薯 15、绵薯 6 号和渝薯 33 分别为综合指标 CI₃, CI₄, CI₅ 下最不耐荫的品种, 隶属函数值均为 0.00。

2.3.3 权重的确定

根据各主成分的贡献率计算各主成分的权重, 结果分别为 36.82%, 28.78%, 14.46%, 12.09% 和 7.86%。

2.3.4 综合评价及聚类分析

根据各综合指标的隶属函数值及其权重计算出不同甘薯品种(系)的综合评价 D 值(表 5), 对各甘薯品种(系)所对应的 D 值进行排序, 其中渝薯 17 的 D 值最大, 为 0.78, 表明其耐荫性最强; 绵薯 6 号的 D 值最小, 为 0.25, 表明其耐荫性最差。采用欧氏距离离差平方和法对 D 值进行聚类分析(图 1), 将 29 个甘薯品种(系)分成 3 类, 渝薯 17、宁紫薯 1 号、1386-4、徐 22、渝薯 38 和渝红心薯 98 归为第 I 类, 共 6 个品种(系), 耐荫性最强, 其 D 值在 0.63~0.78 之间, 表明这些品种(系)综合表现好, 对弱光胁迫适应性强; 渝紫薯 2 号、渝薯 11、渝薯 2 号、龙薯 9 号、渝薯 6 号、1446-5、渝紫薯 153、南薯 88、渝薯 12、渝薯 198、渝薯 15、川紫薯 6 号, 南紫薯 018、渝苏 162 和 13-3-19 归为第 II 类, 共 15 个品种(系), 耐荫性适中, 其 D 值在 0.43~0.53 之间, 此类品种综合表现较好, 对弱光胁迫有较强的适应性; 渝紫香 10 号、万薯 7 号、渝薯 50、渝薯 33、黔薯 8 号、渝红心薯 46、渝薯 4 号和绵薯 6 号归为第 III 类, 共 8 个品种, 耐荫性最弱, 其 D 值在 0.25~0.40 之间, 各品种综合表现差, 对弱光胁迫敏感, 适应性差。

表 5 各品种(系)的综合指标值、权重、 $u(X_j)$ 、 D 值及综合评价

品种	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	CI ₅	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	$u(X_5)$	D 值	综合评价
渝苏 162	0.45	0.12	-1.60	-0.53	0.04	0.53	0.52	0.18	0.33	0.47	0.45	中度耐荫
渝薯 12	0.92	0.26	-1.29	-0.97	-0.73	0.59	0.54	0.24	0.25	0.29	0.46	中度耐荫
徐 22	1.01	3.48	0.57	-1.23	0.69	0.60	0.96	0.59	0.21	0.62	0.66	强耐荫
渝红心薯 46	-2.34	-1.03	-0.31	-0.87	0.86	0.14	0.37	0.43	0.27	0.66	0.30	不耐荫
渝薯 38	3.34	0.70	-0.50	-0.57	0.37	0.93	0.59	0.39	0.32	0.54	0.65	强耐荫
渝薯 198	-0.04	1.32	-1.53	-0.53	-0.43	0.46	0.67	0.20	0.33	0.36	0.46	中度耐荫
1446-5	-1.39	1.50	0.12	-0.28	0.63	0.27	0.70	0.51	0.37	0.60	0.47	中度耐荫
龙薯 9 号	-0.26	1.46	-0.64	-0.65	-0.11	0.43	0.69	0.36	0.31	0.43	0.48	中度耐荫
渝薯 4 号	-3.35	-0.68	1.36	-2.24	0.32	0.00	0.41	0.74	0.03	0.53	0.27	不耐荫
绵薯 6 号	-2.28	-1.28	0.10	-2.39	-0.27	0.15	0.33	0.50	0.00	0.39	0.25	不耐荫
渝薯 2 号	1.09	-2.91	2.66	0.45	-0.50	0.61	0.12	0.99	0.50	0.34	0.49	中度耐荫
渝薯 11	1.35	-1.86	1.77	-0.37	-0.05	0.65	0.26	0.82	0.36	0.44	0.51	中度耐荫
渝薯 6 号	1.70	-1.52	0.05	-0.83	-0.40	0.70	0.30	0.49	0.28	0.36	0.48	中度耐荫
渝紫薯 2 号	0.07	1.45	0.62	0.51	-1.34	0.47	0.69	0.60	0.52	0.15	0.53	中度耐荫
南薯 88	-2.06	1.64	0.66	0.22	0.61	0.18	0.72	0.61	0.46	0.60	0.46	中度耐荫
1386-4	2.55	0.66	0.51	0.20	0.92	0.82	0.59	0.58	0.46	0.67	0.66	强耐荫
渝薯 17	2.11	3.82	2.71	0.70	-1.56	0.76	1.00	1.00	0.55	0.09	0.78	强耐荫
渝紫香 10 号	-2.86	-0.28	0.29	3.24	0.32	0.07	0.46	0.54	1.00	0.53	0.40	不耐荫
渝红心薯 98	3.87	-1.08	-0.86	0.79	0.27	1.00	0.36	0.32	0.57	0.52	0.63	强耐荫
万薯 7 号	-1.58	-0.36	0.19	0.64	-0.66	0.25	0.45	0.52	0.54	0.30	0.39	不耐荫
渝薯 15	0.12	0.72	-2.56	0.79	-0.13	0.48	0.60	0.00	0.56	0.43	0.45	中度耐荫
13-3-19	1.00	-2.74	-0.62	0.57	0.61	0.60	0.14	0.37	0.53	0.60	0.43	中度耐荫
宁紫薯 1 号	1.89	1.33	0.51	-0.29	2.33	0.73	0.68	0.58	0.37	1.00	0.67	强耐荫
川紫薯 6 号	-0.23	-0.18	0.29	0.75	-1.63	0.43	0.48	0.54	0.56	0.08	0.45	中度耐荫
渝薯 50	-0.32	-0.82	-1.51	0.06	-0.07	0.42	0.39	0.20	0.44	0.44	0.38	不耐荫
渝薯 33	-0.91	-0.43	-1.73	-0.06	-1.96	0.34	0.45	0.16	0.41	0.00	0.33	不耐荫
黔薯 8 号	-3.36	-0.74	0.97	0.06	0.19	0.00	0.40	0.67	0.43	0.50	0.31	不耐荫
南紫薯 018	1.77	-3.85	0.27	0.60	0.44	0.71	0.00	0.54	0.53	0.56	0.45	中度耐荫
渝紫薯 153	-2.26	1.30	-0.50	2.24	1.26	0.15	0.67	0.39	0.82	0.75	0.46	中度耐荫
权重/%						36.82	28.78	14.46	12.09	7.86		

2.4 不同评价方法与产量间的比较

不同甘薯品种(系)遮荫后产量的变化是其耐荫性强弱的直接表现,将不同评价方式的分类结果与产量减幅进行比较(表 6),结果显示采用单项指标和综合指标评价的各类别间平均产量减幅表现不同.以茎干质量评价的第 II 类平均产量减幅显著低于第 I 类和第 III 类,第 I 类平均产量减幅又显著低于第 III 类;以净光合速率评价的第 I 类平均产量减幅稍低于第 II 类,差异无统计学意义,第 III 类平均产量减幅显著高于第 I 类和第 II 类;以非光化学猝灭系数评价的第 I 类平均产量减幅显著高于第 II 类和第 III 类,但第 II 类和第 III 类平均产量减幅差异无统计学意义.综合指标评价的各类别间则存在一定的规律性,即第 I 类的平均产量减幅显著低于第 II 类和第 III 类,第 II 类平均产量减幅显著低于第 III 类.上述结果表明,单项指标评价结果与产量减幅表现不一致,而综合指标评价的结果与产量减幅变化一致,说明综合评价结果与产量的关联度更高,更加可靠.

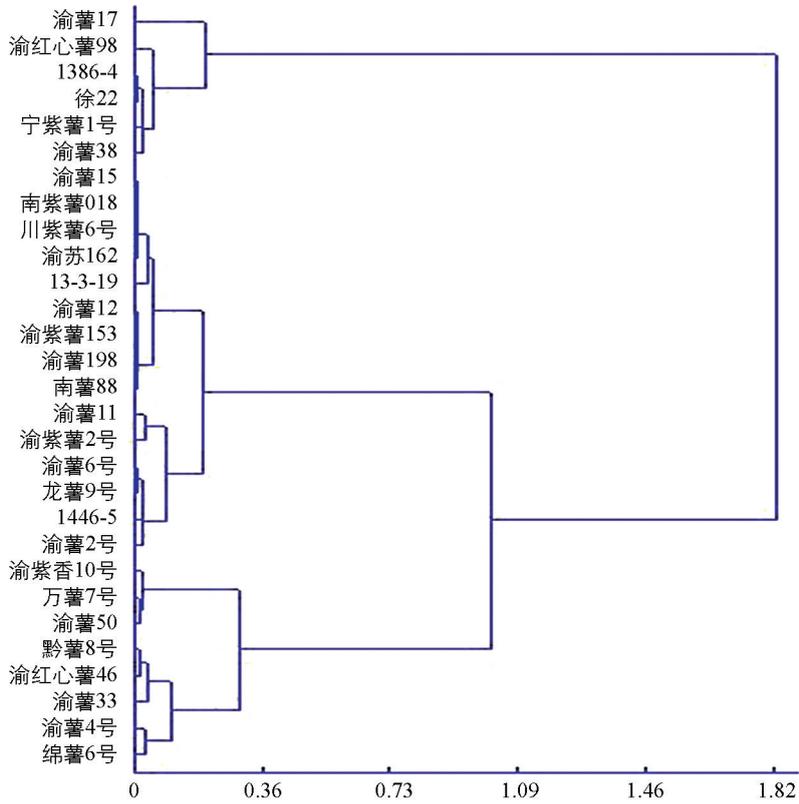


图 1 29 个甘薯品种(系)综合评价值的聚类分析

表 6 不同评价方法各分类材料的产量特征

评价指标	类别	处理	平均产量/kg	产量减幅/%
茎干质量	I	CK	2 588.80	50.94±1.00b
		T	1 269.33	
	II	CK	2 387.77	46.28±0.53c
		T	1 282.57	
	III	CK	2 235.20	57.47±0.35a
		T	950.58	
净光合速率	I	CK	2 309.69	45.47±0.89b
		T	1 258.90	
	II	CK	2 312.73	47.98±0.56b
		T	1 202.94	
	III	CK	2 443.50	60.89±0.75a
		T	955.02	
非光化学猝灭系数	I	CK	2 791.47	60.40±3.03a
		T	1 099.02	
	II	CK	1737.87	47.26±0.41b
		T	916.44	
	III	CK	2 538.23	50.33±0.43b
		T	1 260.59	

续表 6

评价指标	类别	处理	平均产量/kg	产量减幅/%
综合指标	I	CK	1 979.73	39.16±1.03c
		T	1 204.03	
	II	CK	2 557.65	51.62±0.43b
		T	1 237.24	
	III	CK	2 246.93	58.94±0.93a
		T	921.87	

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义. 类别中 I 为强耐荫型, II 为中度耐荫型, III 为不耐荫型.

3 讨论与结论

在实际生产过程中, 间套作等复合种植模式下的高位作物会对低位作物产生荫蔽作用, 形成弱光环境, 从而影响低位作物的植株形态、产量及品质形成等. 了解作物的耐荫特性、评价材料的耐荫性强弱是研究作物耐荫性相关机理的重要基础^[20], 对不同材料的比较、筛选及促进作物在间套作模式下的推广和应用有重要意义^[21]. 关于作物耐荫性评价的研究很多, 但因作物不同、目标不同、评价指标与方法不同而存在较大差异. 李春红等^[8]在玉米-大豆带状复合种植下调查了大豆成熟期主茎高、茎粗、主茎节数、分枝数、底荚高度等 14 个单项指标, 武晓玲等^[9]则调查大豆苗期叶柄干质量、茎干质量、净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率和暗下最大荧光等 24 项指标, 均采用主成分分析、隶属函数分析等方法对不同大豆材料耐荫性进行了综合评价, 最终将其分为强耐荫、中度耐荫和不耐荫 3 类. 黄其椿等^[22]采用综合耐荫系数评价大豆耐荫性. 吴亚男^[12]根据产量这一单项指标的耐荫指数对玉米耐荫性进行了评价, 通过聚类分析将其分为耐荫和不耐荫两类. 本研究不仅对 12 个单项指标的耐荫系数进行了评价, 同时在 12 个单项指标中选择变异系数和相关系数较大的指标, 并对茎干质量、净光合速率和非光化学猝灭系数耐荫系数等进行单独聚类; 与此同时, 对 12 个指标的耐荫系数采用主成分分析、隶属函数分析等方法对耐荫性进行综合评价, 并对其综合评价值做聚类分析. 结果表明, 通过不同单项指标聚类, 同一甘薯品种(系)所属类别不同, 其分类结果与综合评价结果也有所差别, 将单项指标聚类出的各类别和综合指标聚类出的各类别与产量进行比较, 发现单项指标各类别间产量减幅存在一定差异, 只有综合聚类的分类结果与平均产量减幅的规律一致, 这说明综合评价方法的可靠性和准确性更高, 这与刘勋等^[23]对马铃薯耐荫性综合评价时与平均产量减幅比较的结果一致. 与综合评价方法相比, 尽管采用单项指标耐荫系数单独评价方便简单, 但多个单项指标聚类的各类别与平均产量减幅变化不一致, 这说明甘薯耐荫性是一个复杂的综合性状, 单项指标评价具有一定的片面性, 不能对甘薯耐荫性进行全面、准确的评价^[24].

综上, 基于多个单项指标, 通过主成分分析和隶属函数分析法, 对甘薯的耐荫性进行评价并分类的结果更加可靠, 其耐荫系数大小与不同甘薯品种在遮荫条件下的产量减幅变化基本一致, 研究结果对于合理选择间套作甘薯品种提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 何学利. 逆境及植物对逆境的适应性综述 [J]. 现代农业科技, 2010(11): 30, 33.
- [2] FALSTERD S, DUURSMA R A, FITZJOHN R G. How Functional Traits Influence Plant Growth and Shade Tolerance across the Life Cycle [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(29): E6789-E6798.
- [3] VALLADARES F, NIINEMETS Ü. Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 237-257.
- [4] 安锋, 林位夫. 植物耐荫性研究的意义与现状 [J]. 热带农业科学, 2005, 25(2): 68-72.

- [5] 魏丽萍, 黄菁, 周会平, 等. 遮荫对不同种源菠萝蜜幼苗雨季与旱季生长及生理生化特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 1-8.
- [6] 黄菁, 魏丽萍, 孙小龙, 等. 遮阴条件下大叶竹节树光合特性和荧光参数的变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 68-74.
- [7] 陈怀珠, 孙祖东, 杨守臻, 等. 荫蔽对大豆主要性状的影响及大豆耐荫性鉴定方法研究初报 [J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4): 78-82.
- [8] 李春红, 姚兴东, 鞠宝韬, 等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(15): 2927-2939.
- [9] 武晓玲, 梁海媛, 杨峰, 等. 大豆苗期耐荫性综合评价及其鉴定指标的筛选 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2497-2507.
- [10] 李彩斌, 郭华春. 马铃薯品种耐弱光性评价及其指标的筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3461-3472.
- [11] 童小兰. 四川地区弱光对黄瓜生长发育的影响及耐弱光黄瓜材料的筛选 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [12] 吴亚男. 不同玉米品种耐阴性评价及高产群体结构 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [13] LI X, ZHU S D, LIU Y X, et al. Multivariate Statistical Analysis of Low-light Tolerance in Tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) Cultivars and Their Ultrastructural Observations [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2013, 32(3): 646-653.
- [14] 刘钟, 薛英利, 杨圆满, 等. 人工遮阴条件下 3 个马铃薯品种耐阴性研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(4): 566-574.
- [15] 李静, 傅玉凡, 黄雨, 等. 10 个叶菜型甘薯品种茎尖性状的分析与评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 45-53.
- [16] 王璐璐, 黄雨, 傅玉凡, 等. 甘薯淀粉相关性状变异性的分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 39-47.
- [17] 林先明, 戴清堂, 徐怡, 等. 耐荫性甘薯鲜薯产量与主要农艺性状的灰色关联度分析 [J]. 种子, 1999, 18(6): 51-53.
- [18] 叶尚红. 植物生理生化实验教程 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- [19] 谢志坚. 农业科学中的模糊数学方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1983: 99-193.
- [20] 张娇. 主食化马铃薯育种亲本的筛选及耐荫性评价体系的建立 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [21] 孙祖东, 张志鹏, 蔡昭艳, 等. 大豆耐荫性评价体系的建立与中国南方大豆资源耐荫性变异 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(5): 792-801.
- [22] 黄其椿, 李初英, 赵洪涛, 等. 菜用大豆种质资源遮光胁迫下的耐荫性研究 [J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2212-2217.
- [23] 刘勋, 张娇, 沈昱辰, 等. 基于光合系统参数建立马铃薯耐荫性综合评价体系 [J]. 植物学报, 2019, 54(3): 360-370.
- [24] 杨才琼, 胡宝予, 吴海军, 等. 黑豆种质苗期耐荫性评价及其根系对弱光胁迫的响应 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 893-902.

责任编辑 周仁惠