

塔额盆地食用向日葵品种产量敏感性分析

王贺亚 罗静静 孟玲 艾海峰 王斌 李怀胜 徐靖鹏 徐向阳

(新疆生产建设兵团第九师农业科学研究所(畜牧科学研究所), 834700, 新疆塔城)

摘要 为保证塔额盆地食用向日葵的高产, 探明食用向日葵产量敏感性, 生育期间调查影响产量的相关性状。从新疆食用向日葵品种中选取 27 个品种, 对其 11 个主要性状与产量遗传相关性和通径系数进行分析。结果表明, 单盘粒重、结实率、株高和百粒重等 4 个性状变量与产量显著相关, 与产量的直接作用系数分别为 0.7082、0.2742、0.2039 和 -0.3381; 间接作用系数范围在 -0.1999~0.5935。在遗传相关分析的基础上进一步进行通径分析, 表明对产量影响最敏感的 3 个变量分别是单盘粒重、结实率和株高; 对产量影响低敏感性的性状有籽仁率、籽粒宽和单盘粒数。因此, 初步认为在食用向日葵育种中, 为保证高产要首选单盘粒重大、结实率高及株高适当的品种, 同时兼顾其他性状, 协调好各性状的关系。

关键词 塔额盆地; 食用向日葵; 产量; 敏感性; 通径分析

向日葵原产于拉丁美洲, 为菊科向日葵属的一年生草本植物, 是世界上主要的经济作物之一^[1], 具有生物量大、适应性强等特点^[2]。表型相关性是食用向日葵产量形成的基础, 决定品种的高产、稳产特性。食用向日葵产量调控机制复杂, 不同的性状指标会有不同程度的影响。在向日葵产量与性状综合评价方面, 使用相关性分析^[3-5]、主成分分析^[6-7]和聚类分析^[8-9]等方法较多, 但由于农艺性状之间存在复杂的相关关系, 常见的回归和相关性分析等很难明确单项农艺性状是如何影响食葵品种综合性状表现的, 而通径分析因其可以揭示自变量与因变量间直接和间接作用关系, 在多种作物的农艺性状与产量相互关系研究方面得到广泛应用^[10-12], 罗静静等^[13]研究报道过食葵产量与经济性状的相关性会因品种及生产环境不同而出现差异。

探明食葵高产的影响因素是保证产量的关键, 本试验以 27 个食用向日葵品种为试验材料, 采用通径分析结合敏感性分析对 11 个农艺性状与产量进行遗传相关性分析, 同时进行通径分析, 利用性状指标与产量直接效应和间接效应, 进一步确定影响产量形成指标的主次关系以及相对重要性, 明确食用向日葵品种相关指标对产量形成的影响大小, 把握关键控制指标, 揭示产量变化机制, 通过表型选择以达到选育高产优质食用向日葵品种的目的, 为今后塔额盆地食葵育种提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试品种及来源

供试的 27 个食用型向日葵品种及来源见表 1。

表 1 品种名称及来源
Table 1 Varieties and sources

序号 Number	品种 Variety	来源 Source
1	三瑞 11 号	三瑞农业科技股份有限公司
2	三瑞 3 号	三瑞农业科技股份有限公司
3	三瑞 383	三瑞农业科技股份有限公司
4	三瑞 373	三瑞农业科技股份有限公司
5	HZ2399	新疆农业科学院
6	HZ2271	新疆农业科学院
7	HZ2272	新疆农业科学院
8	HZ2278	新疆农业科学院
9	双星 6 号	河北双星种业股份有限公司
10	金宝 3 号	新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所
11	金宝 636	新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所
12	同庆 6 号	酒泉市同庆种业有限责任公司
13	金禾 8 号	北京科丰达种业科技有限公司
14	t36	新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所
15	SH363	三瑞农业科技股份有限公司
16	双星 5 号	河北双星种业股份有限公司
17	福星 1 号	酒泉市同庆种业有限责任公司
18	乐丰 30	河北双星种业股份有限公司
19	飞天 1 号	新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所
20	凯福瑞 2 号	北京凯福瑞科技股份有限公司
21	双星 60	河北双星种业股份有限公司

作者简介: 王贺亚, 研究方向为作物栽培、育种与水肥一体化, E-mail: 1209399827@qq.com

罗静静为通信作者, 研究方向为作物栽培及病虫害防治, E-mail: 860220521@qq.com

基金项目: 新疆生产建设兵团科技特派项目(2022CB023); 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目(2021AB011)

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-05-26; 网络出版日期: 2025-01-13

续表 1 Table 1 (continued)

序号 Number	品种 Variety	来源 Source
22	双星 11	河北双星种业股份有限公司
23	AD650	新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所
24	同辉 32	甘肃同辉种业有限责任公司
25	乐丰 5 号	河北双星种业股份有限公司
26	xks2098	新疆农垦科学院
27	xks2030	新疆农垦科学院

1.2 试验地与试验方法

试验于 2023 年 5-9 月份在新疆兵团第九师农业（畜牧）科学研究所团结农场试验地进行。试验采用随机排列，3 次重复，小区面积 46.8 m²（长 12.0 m×宽 3.9 m），宽窄行（90 cm+40 cm）种植，株距 60 cm，种植密度为 25 635 株/hm²。试验地前茬作物为小麦，土壤有机质 21.6 g/kg、碱解氮 76.5 mg/kg、有效磷 17.5 mg/kg、速效钾 209.8 mg/kg。栽培管理水平同当地大田生产，防虫不防病。

选取 10 株具有代表性的植株在作物成熟期测定指标，并同时取样，通过考种取得当年产量构成数据。

生育期间试验地 5-9 月气象数据见图 1，平均温度为 20.64 ℃，5-9 月月平均温度分别为 15.8 ℃、24.0 ℃、25.3 ℃、22.7 ℃和 15.4 ℃；生产期间平均降水量为 17.24 mm，5-9 月月平均降水量分别为 0.8、2.3、7.0、26.8 和 49.4 mm。

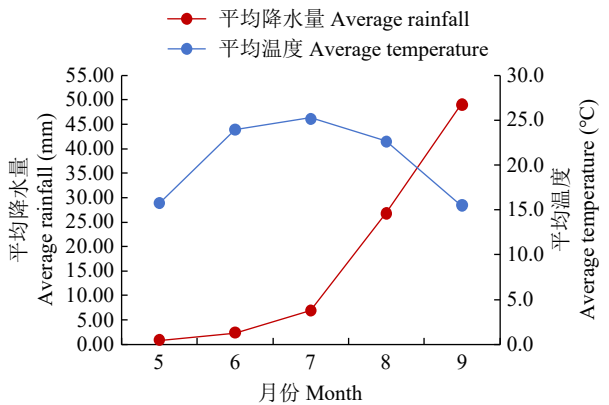


图 1 试验地区生产期月平均降水量和平均温度
Fig.1 The average monthly rainfall and average temperature during the production period in the test area

1.3 食用向日葵品种主要农艺性状及产量

在土壤类型及田间管理水平一致的前提下，参试的 27 个品种主要农艺性状及产量数值见表 2。

表 2 食用向日葵的主要农艺性状
Table 2 Main agronomic traits of edible sunflower

编号 Number	品种 Variety	性状 Trait											
		X ₁ (cm)	X ₂ (cm)	X ₃	X ₄ (cm)	X ₅ (mm)	X ₆ (mm)	X ₇ (g)	X ₈ (g)	X ₉	X ₁₀ (%)	X ₁₁ (%)	Y (kg/hm ²)
1	三瑞 11 号	194.00	38.51	24.60	31.37	22.30	9.20	18.20	188.68	933.50	51.23	88.25	3834.00
2	三瑞 3 号	302.80	42.42	29.20	29.75	21.90	9.40	18.80	179.64	935.25	48.96	82.65	3363.75
3	三瑞 383	312.40	34.64	30.60	28.08	21.60	9.35	18.60	182.62	925.30	49.36	81.27	3283.50
4	三瑞 373	290.20	40.73	29.60	27.07	22.10	9.28	18.50	179.52	946.21	49.25	82.31	3252.75
5	HZ2399	275.80	34.84	24.60	23.32	21.50	9.51	19.20	185.69	963.50	48.35	82.21	3398.70
6	HZ2271	314.00	39.34	31.80	31.82	21.20	8.98	19.40	183.57	918.30	48.25	79.56	3488.10
7	HZ2272	314.80	43.31	30.60	29.64	21.60	9.65	19.23	183.25	925.36	47.86	80.65	3288.15
8	HZ2278	276.80	40.86	26.60	37.58	20.80	9.16	19.15	184.32	932.40	50.35	79.35	3095.55
9	双星 6 号	298.89	31.87	26.56	25.79	24.67	9.44	18.21	169.25	930.77	46.69	78.67	3116.38
10	金宝 3 号	345.78	44.24	29.44	29.13	27.54	9.66	24.60	207.61	917.72	39.90	82.53	3774.44
11	金宝 636	280.89	25.17	19.89	23.84	22.70	9.19	18.54	184.10	989.08	54.47	81.64	3340.66
12	同庆 6 号	277.33	31.24	30.00	25.63	23.70	8.51	17.27	145.10	834.45	50.26	70.86	2904.01
13	金禾 8 号	295.78	28.66	24.33	23.63	22.72	9.25	19.41	193.18	1030.36	51.11	86.09	3396.54
14	t36	261.78	33.46	23.56	25.05	25.92	10.03	20.85	198.64	953.04	44.47	75.56	3445.53
15	SH363	295.78	28.66	24.33	23.63	23.54	9.44	18.72	182.27	1130.25	50.23	83.25	3503.10
16	双星 5 号	242.33	40.20	26.50	26.33	22.94	7.94	17.27	181.04	1048.41	47.20	80.21	3131.11
17	福星 1 号	218.67	37.58	24.80	30.17	24.41	9.04	22.44	177.95	792.87	46.25	77.65	2809.66
18	乐丰 30	183.00	36.46	25.20	29.33	23.18	9.17	19.82	183.22	924.44	47.31	78.24	2893.00
19	飞天 1 号	225.33	39.19	25.60	23.98	24.05	7.83	16.25	166.22	1022.89	44.86	79.45	2881.10
20	凯福瑞 2 号	215.00	35.35	24.30	25.35	21.39	7.48	16.93	147.66	872.03	49.56	72.56	2331.52
21	双星 60	222.67	36.09	25.40	26.21	23.15	8.86	17.71	155.56	878.57	48.25	75.21	2456.29
22	双星 11	268.00	44.06	28.60	32.20	24.89	8.94	23.80	198.43	934.72	48.35	80.26	3512.08

续表 2 Table 2 (continued)

编号 Number	品种 Variety	性状 Trait											
		X ₁ (cm)	X ₂ (cm)	X ₃	X ₄ (cm)	X ₅ (mm)	X ₆ (mm)	X ₇ (g)	X ₈ (g)	X ₉	X ₁₀ (%)	X ₁₁ (%)	Y (kg/hm ²)
23	AD650	261.67	37.33	26.50	31.40	23.96	9.57	22.95	173.21	754.83	49.58	79.65	2734.88
24	同辉 32	241.00	40.71	26.80	26.70	26.14	9.29	19.72	169.50	859.53	48.32	78.25	2676.30
25	乐丰 5 号	276.67	41.89	27.20	26.82	25.62	8.78	18.94	203.53	1137.95	46.20	85.69	4001.18
26	xks2098	233.33	38.92	26.80	28.47	22.92	8.45	19.57	202.07	1032.74	47.60	82.12	3190.64
27	xks2030	171.33	40.15	27.40	25.17	23.79	8.62	20.89	206.12	1010.64	47.90	80.35	3333.50

X₁: 株高; X₂: 茎粗; X₃: 叶片数; X₄: 单盘直径; X₅: 籽粒长; X₆: 籽粒宽; X₇: 百粒重; X₈: 单盘粒重; X₉: 单盘粒数; X₁₀: 籽仁率; X₁₁: 结实率; Y: 产量; 下同。
X₁: plant height; X₂: stem diameter; X₃: number of leaves; X₄: head diameter; X₅: grain length; X₆: grain width; X₇: 100-grain weight; X₈: grain weight per head; X₉: grains per head; X₁₀: seed kernel rate; X₁₁: seed-setting rate; Y: yield; the same below.

1.4 分析方法

通径系数分析方法 (PathCoefficient) 是将简单相关系数分解为多个部分, 用以表示某一变量和其他变量对因变量的直接作用和间接作用效果^[14-15]。利用 Sewall Wright 求得各主要性状间的关系、对产量的相互关系及各性状与产量的直接作用和间接作用系数; 利用多元回归法建立食用向日葵最优产量回归方程; 通过去除某一性状变量求得相关系数及直接和间接通径系数, 再计算出单一性状及两两性状对食用向日葵产量的决定系数以及总贡献 (R^2), 根据此方法来确定变量中对产量的敏感因素和非敏感因素。

1.5 数据处理

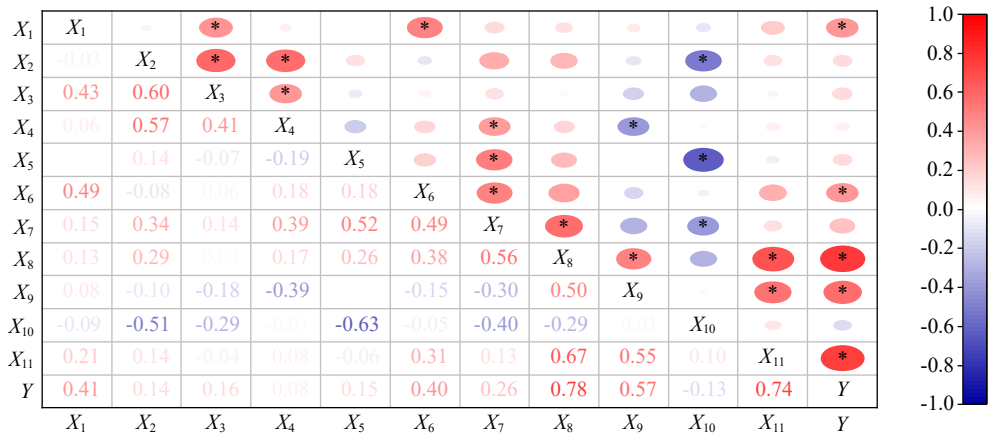
利用 Excel 对数据进行录入、整理、制表及绘图, 利用 SPSS 21.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 食用向日葵不同性状指标对产量的直接和间接作用

使用相关分析法分析得出不同指标间的相关系数 (r_{ij}), 使用通径分析得出通径系数 (P_{yi})、决定系数 (d_{ij}) 和总贡献率 (R^2) 等, 解出对产量影响敏感性的性状指标。首先利用相关分析和通径分析得出数学模型^[16]和矩阵算法^[17], 再根据相关系数和通径系数得出食用向日葵 11 个主要性状指标对产量 Y 的相关系数 (图 2) 和通径系数 (表 3)。各性状通径系数绝对值能清晰反映对产量 Y 的影响。

由表 2 可知, 各性状指标对产量 (Y) 的直接影响力依次为单盘粒重 (0.7082) > 百粒重



*: $P < 0.05$.

图 2 各性状指标之间的相关系数
Fig.2 Correlation coefficients among various traits

(-0.3381) > 结实率 (0.2742) > 籽粒长 (0.2500) > 株高 (0.2039) > 叶片数 (0.1921) > 茎粗 (-0.1534) > 单盘直径 (0.1154) > 籽仁率 (0.0741) > 籽粒宽 (0.0335) > 单盘粒数 (0.0257)。

主要性状指标不仅对产量有直接作用, 通过其他性状指标对产量也有间接作用。由表 3 可以看出, 对产量的间接作用影响最大的为百粒重 (X_7), 其间接作用系数总和为 0.5935, 第 2~5

名分别为单盘粒数 (X_9)、结实率 (X_{11})、籽粒宽 (X_6) 和茎粗 (X_2)，范围为 0.5481~0.2975。对产量的间接作用最弱的有叶片数 (X_3)、单盘直径 (X_4) 和单盘粒重 (X_8)。

表 3 向日葵相关变量对产量影响的直接和间接作用分析
Table 3 Analysis of direct and indirect effects of sunflower related variables (X_i) on yield (Y)

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	总和 Sum	间接作用系数 Indirect action coefficient										
				X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	0.4120	0.2039	0.2081		0.0052	0.0827	0.0074	0.0006	0.0162	-0.0499	0.0933	0.0021	-0.0063	0.0568
X_2	0.1440	-0.1534	0.2975	-0.0070		0.1151	0.0664	0.0338	-0.0027	-0.1136	0.2081	-0.0025	-0.0377	0.0376
X_3	0.1600	0.1921	-0.0326	0.0878	-0.0920		0.0472	-0.0185	0.0020	-0.0468	0.0242	-0.0046	-0.0212	-0.0107
X_4	0.0750	0.1154	-0.0408	0.0131	-0.0882	0.0785		-0.0467	0.0059	-0.1323	0.1188	-0.0100	-0.0010	0.0211
X_5	0.1480	0.2500	-0.1019	0.0005	-0.0207	-0.0142	-0.0216		0.0061	-0.1745	0.1855	0.0001	-0.0468	-0.0163
X_6	0.4040	0.0335	0.3702	0.0989	0.0125	0.0115	0.0204	0.0454		-0.1640	0.2682	-0.0039	-0.0037	0.0849
X_7	0.2550	-0.3381	0.5935	0.0301	-0.0516	0.0266	0.0452	0.1291	0.0162		0.3987	-0.0076	-0.0294	0.0362
X_8	0.7790	0.7082	0.0705	0.0269	-0.0451	0.0066	0.0194	0.0655	0.0127	-0.1903		0.0127	-0.0216	0.1837
X_9	0.5740	0.0257	0.5481	0.0163	0.0152	-0.0344	-0.0449	0.0013	-0.0051	0.0998	0.3506		-0.0009	0.1502
X_{10}	-0.1260	0.0741	-0.1999	-0.0174	0.0781	-0.0549	-0.0015	-0.1579	-0.0017	0.1341	-0.2064	-0.0003		0.0280
X_{11}	0.7440	0.2742	0.4697	0.0422	-0.0210	-0.0075	0.0089	-0.0148	0.0104	-0.0447	0.4745	0.0141	0.0076	

2.2 食用向日葵不同性状指标对产量的决定系数和 R^2 总贡献的影响

通过各性状指标 X_i 及两两性状指标和误差项 (d_{ye}) 得出 Y 的决定系数 d_{ij} 进行排序，通过直接作用和间接作用系数求解 11 个性状对 R^2 的总贡献进行排名，即计算 $r_j P_y$ ，前 11 名及误差项的决定系数结果和对 R^2 总贡献见表 4。

表 4 表明，单盘粒重 (X_8) 对产量 (Y) 的决定系数最高，为 0.5015，且 X_8 对 R^2 的总贡献同各性状指标相比排名第 1，为 0.5517，说明影响产量的最重要性状指标为单盘粒重；单盘粒重 (X_8) 和百粒重 (X_7) 之间协同效应对产量 (Y) 的相对决定程度排名第 2 位，为 0.4490；结实率 (X_{11}) 对 R^2 总贡献为 0.2040，排名第 2；其他各变量对食用向日葵产量的 R^2 总贡献较小，影响程度较低。这与前面 2.1 部分分析的结果 (表 3) 相同，进一步验证了对食用向日葵产量的影响程度较大的性状指标为单盘粒数、结实率和百粒重，说明这 3 个指标是产量构成的重要影响因素。此外，误差项 d_{ye} 对食用向日葵产量 Y 的相对决定系数为 0.1733，排名较低，说明分析误差较小。

2.3 食用向日葵不同性状指标对产量的敏感性分析

在上述通径分析结果的基础上进行了敏感性分析，进一步了解产量 (Y) 形成相关性状指标的影响。敏感性分析是根据各变量对评价指标的非敏感性或敏感性判断，利用逐步剔除法确定各变量对评价指标相对重要性的一种分析法^[18-19]。

表 4 向日葵相关变量对产量的决定系数和对 R^2 的总贡献
Table 4 Determination coefficient of sunflower related variables on yield and total contribution to R^2

次序 Order	决定系数 (R^2) Coefficient of determination		对 R^2 的总贡献 Total contribution to R^2	
	d_{ij}	值 Value	$r_j P_y$	贡献 Contribution
1	d_{8-8}	0.5015	$r_8 P_8$	0.5517
2	d_{8-7}	0.4490	$r_{11} P_{11}$	0.2040
3	d_{11-8}	0.2462	$r_7 P_7$	0.0862
4	d_{7-8}	0.2143	$r_1 P_1$	0.0840
5	d_{8-6}	0.2035	$r_5 P_5$	0.0370
6	d_{5-10}	0.1997	$r_3 P_3$	0.0307
7	d_{7-5}	0.1800	$r_2 P_2$	0.0221
8	d_{7-6}	0.1591	$r_9 P_9$	0.0148
9	d_{5-7}	0.1331	$r_6 P_6$	0.0135
10	d_{8-2}	0.1224	$r_{10} P_{10}$	0.0093
11	d_{7-7}	0.1143	$r_4 P_4$	0.0087
误差 Error	d_{ye}	0.1733		

决定系数一列中，当 d_{ij} 的 $i=j$ 时，指该因子对向日葵产量的决定系数； $i \neq j$ 时，指这 2 个变量共同对产量的决定系数； d_{ye} 即误差项决定系数。

In the coefficient of determination column, when $i=j$ in d_{ij} , it refers to the coefficient of determination of the factor on sunflower yield; when $i \neq j$, it refers to the coefficient of determination of the two variables on the yield; d_{ye} is the coefficient of determination of the error.

2.3.1 敏感性因素和非敏感性因素的筛选分析 根据 11 个性状指标 (X_i) 对产量 (Y) 的通径分析，通过对 R^2 总贡献影响的大小做筛选去除进行分析。在 11 个性状指标分别去除后，对产量 (Y) 的直接与间接作用系数随着指标去除均会发生变化，继而决定系数与 R^2 总贡献也会产生变化，结果见表 5、表 6。由表 5 可知，去掉 X_1 后，直接和间接作用影

响最大的均是 X_9 ；去掉 X_3 后，直接作用影响最大 的是 X_1 ，间接作用影响最大的是 X_2 ；去掉 X_5 指标

表 5 剔除某变量后对剩余变量直接作用和间接作用的影响
Table 5 Effects of eliminating a variable on the direct and indirect effects of the remaining variables

编号 Number	变量数量 Number of variables	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5		X_6	
		直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection
1	11	0.204	0.208	-0.153	0.297	0.192	-0.033	0.115	-0.040	0.250	-0.102	0.034	0.371
2	10 (去 X_1)			-0.249	0.393	0.320	-0.161	0.140	-0.066	0.214	-0.066	0.130	0.274
3	10 (去 X_2)	0.245	0.167			0.124	0.036	0.054	0.020	0.249	-0.101	0.060	0.344
4	10 (去 X_3)	0.314	0.098	-0.017	0.161			0.102	-0.028	0.234	-0.085	0.019	0.385
5	10 (去 X_4)	0.217	0.195	-0.078	0.221	0.184	-0.024			0.221	-0.073	0.038	0.365
6	10 (去 X_5)	0.165	0.247	-0.150	0.294	0.171	-0.012	0.057	0.017			0.075	0.328
7	10 (去 X_6)	0.219	0.193	-0.163	0.307	0.189	-0.030	0.117	-0.042	0.256	-0.108		
8	10 (去 X_7)	0.137	0.275	-0.166	0.310	0.224	-0.065	0.096	-0.021	0.131	0.017	0.066	0.338
9	10 (去 X_8)	0.055	0.357	-0.169	0.313	0.244	-0.084	0.168	-0.093	0.118	0.030	0.177	0.226
10	10 (去 X_9)	0.210	0.202	-0.153	0.297	0.189	-0.030	0.112	-0.037	0.255	-0.107	0.026	0.378
11	10 (去 X_{10})	0.188	0.224	-0.199	0.343	0.197	-0.037	0.134	-0.060	0.215	-0.067	0.034	0.369
12	10 (去 X_{11})	0.258	0.154	-0.031	0.175	0.133	0.027	0.095	-0.020	0.257	-0.109	0.088	0.316

编号 Number	变量数量 Number of variables	X_7		X_8		X_9		X_{10}		X_{11}	
		直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection
1	11	-0.338	0.594	0.708	0.070	0.026	0.548	0.074	-0.200	0.274	0.470
2	10 (去 X_1)	-0.230	0.486	0.552	0.227	0.163	0.411	0.021	-0.147	0.322	0.422
3	10 (去 X_2)	-0.347	0.602	0.715	0.063	0.026	0.548	0.139	-0.265	0.228	0.516
4	10 (去 X_3)	-0.383	0.638	0.755	0.024	-0.023	0.597	0.087	-0.212	0.230	0.514
5	10 (去 X_4)	-0.321	0.577	0.738	0.041	-0.017	0.591	0.108	-0.233	0.265	0.479
6	10 (去 X_5)	-0.131	0.386	0.558	0.220	0.141	0.433	-0.051	-0.075	0.281	0.463
7	10 (去 X_6)	-0.346	0.602	0.733	0.046	0.000	0.574	0.075	-0.200	0.282	0.462
8	10 (去 X_7)			0.399	0.380	0.267	0.307	0.041	-0.167	0.309	0.434
9	10 (去 X_8)	0.138	0.118			0.501	0.073	-0.033	-0.092	0.415	0.329
10	10 (去 X_9)	-0.357	0.612	0.732	0.047			0.076	-0.202	0.276	0.468
11	10 (去 X_{10})	-0.322	0.577	0.674	0.104	0.036	0.538			0.303	0.441
12	10 (去 X_{11})	-0.403	0.659	0.878	-0.099	0.072	0.502	0.183	-0.309		

“直接”表示直接通路系数；“间接”表示间接作用系数总和。
“Direct” indicate the direct path coefficient; “Indirect” indicate the sum of indirect effect coefficient.

表 6 剔除某变量后对剩余变量 d_{ye} 和 R^2 的影响
Table 6 Effects of removing a variable on the remaining variables d_{ye} and R^2

编号 Number	变量数量 Number of variables	d_{ye}	贡献率 Contribution rate											R^2
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	
1	11	0.1733	0.0840	-0.0221	0.0307	0.0087	0.0370	0.0135	-0.0862	0.5517	0.0148	-0.0093	0.2040	0.8267
2	10 (去 X_1)	0.1895		-0.0358	0.0511	0.0105	0.0317	0.0523	-0.0588	0.4297	0.0934	-0.0027	0.2391	0.8105
3	10 (去 X_2)	0.1790	0.1010		0.0197	0.0041	0.0368	0.0242	-0.0886	0.5569	0.0147	-0.0175	0.1697	0.8210
4	10 (去 X_3)	0.1865	0.1293	-0.0024		0.0076	0.0346	0.0076	-0.0978	0.5878	-0.0133	-0.0109	0.1710	0.8135
5	10 (去 X_4)	0.1787	0.0895	-0.0112	0.0293		0.0328	0.0154	-0.0821	0.5742	-0.0099	-0.0135	0.1969	0.8213
6	10 (去 X_5)	0.1946	0.0680	-0.0216	0.0273	0.0043		0.0303	-0.0334	0.4347	0.0808	0.0064	0.2086	0.8054
7	10 (去 X_6)	0.1744	0.0904	-0.0235	0.0302	0.0087	0.0380		-0.0885	0.5704	-0.0002	-0.0094	0.2096	0.8256
8	10 (去 X_7)	0.1902	0.0564	-0.0238	0.0357	0.0072	0.0194	0.0264		0.3104	0.1530	-0.0051	0.2301	0.8098
9	10 (去 X_8)	0.2256	0.0226	-0.0243	0.0389	0.0125	0.0174	0.0716	0.0352		0.2875	0.0042	0.3088	0.7744
10	10 (去 X_9)	0.1740	0.0867	-0.0221	0.0302	0.0083	0.0378	0.0104	-0.0911	0.5699		-0.0095	0.2054	0.8260
11	10 (去 X_{10})	0.1756	0.0775	-0.0286	0.0313	0.0100	0.0319	0.0138	-0.0823	0.5250	0.0205		0.2251	0.8244
12	10 (去 X_{11})	0.1980	0.1064	-0.0045	0.0212	0.0071	0.0380	0.0354	-0.1030	0.6833	0.0411	-0.0230		0.8020

后，直接和间接作用影响最大的均是 X_7 ；去掉 X_6 后，直接和间接作用影响最大的均是 X_9 ；去掉 X_7 后，直接和间接作用影响最大的均是 X_8 ；去掉 X_8 后，直接和间接作用影响最大的均是 X_9 ；去除 X_{11} 后，直接作用影响最大的是 X_{10} ，间接作用影响最大的是 X_2 。说明株高、叶片数、籽粒长、籽粒宽、百粒重、单株粒重和结实率对食用向日葵产量的形成均有一定的影响。同理，由表 6 可知，去掉 X_1 、 X_3 、 X_5 、 X_7 、 X_8 和 X_{11} 时，均表现为误差项增大， R^2 总贡献减小。说明去除某一性状是引起产量变化的关键因素，产量同时会因指标变化而产生差异。

2.3.2 相关性状对产量的敏感性分析（性状的数量变化）由表 4 可知，对产量影响较小的性状指标是 X_{10} 和 X_4 ，结合表 7，最不敏感指标直接作用和间接作用分析， X_4 直接作用较大，因此先去除 X_{10} ，由表 5 可知，去掉了 X_{10} 后，根据指标对 R^2 贡献程度大小及直接、间接作用影响的原则对剩余指标逐一去除，首先综合分析最小为 X_6 ，因此继续去除 X_6 。表 7 是逐步剔除最不敏感性状指标的直接作用和间接作用分析结果，表 8 是误差项及各个性状指标对 R^2 总贡献结果。去除 X_6 后，再去除 X_9 ，继续去除 X_4 ，依此方法类推，去除 X_4 后，去除 X_5 、 X_3 、

表 7 剔除某变量后对剩余变量直接作用和间接作用的影响
Table 7 The influence of removing a variable on the direct and indirect effects of the remaining variables

编号 Number	变量数量 Number of variables	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5		X_6	
		直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection
1	11	0.204	0.208	-0.153	0.297	0.192	-0.033	0.115	-0.040	0.250	-0.102	0.034	0.371
2	10（去 X_{10} ）	0.188	0.224	-0.199	0.343	0.197	-0.037	0.134	-0.060	0.215	-0.067	0.034	0.369
3	9（再去 X_6 ）	0.204	0.208	-0.209	0.353	0.194	-0.034	0.136	-0.061	0.222	-0.073		
4	8（再去 X_9 ）	0.205	0.207	-0.209	0.352	0.193	-0.033	0.134	-0.059	0.223	-0.075		
5	7（再去 X_4 ）	0.209	0.203	-0.139	0.283	0.190	-0.030			0.155	-0.007		
6	6（再去 X_5 ）	0.225	0.187	-0.115	0.258	0.144	0.015						
7	5（再去 X_3 ）	0.300	0.112	-0.014	0.158								
8	4（再去 X_2 ）	0.301	0.111										
9	3（再去 X_7 ）	0.273	0.139										

编号 Number	变量数量 Number of variables	X_7		X_8		X_9		X_{10}		X_{11}	
		直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection	直接 Direct	间接 Indirection
1	11	-0.338	0.594	0.708	0.070	0.026	0.548	0.074	-0.200	0.274	0.470
2	10（去 X_{10} ）	-0.322	0.577	0.674	0.104	0.036	0.538			0.303	0.441
3	9（再去 X_6 ）	-0.331	0.586	0.699	0.080	0.009	0.565			0.311	0.433
4	8（再去 X_9 ）	-0.338	0.594	0.707	0.071					0.311	0.433
5	7（再去 X_4 ）	-0.259	0.514	0.680	0.099					0.315	0.429
6	6（再去 X_5 ）	-0.190	0.446	0.701	0.077					0.274	0.470
7	5（再去 X_3 ）	-0.209	0.464	0.697	0.081					0.244	0.500
8	4（再去 X_2 ）	-0.213	0.468	0.696	0.083					0.243	0.500
9	3（再去 X_7 ）			0.512	0.267					0.344	0.400

表 8 误差项及各个性状指标对 R^2 总贡献结果
Table 8 The total contribution of error term and each trait index to R^2

编号 Number	变量数量 Number of variables	d_{ye}	贡献率 Contribution rate											R^2
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	
1	11	0.1733	0.0840	-0.0221	0.0307	0.0087	0.0370	0.0135	-0.0862	0.5517	0.0148	-0.0093	0.2040	0.8267
2	10（去 X_{10} ）	0.1756	0.0775	-0.0286	0.0313	0.0100	0.0319	0.0138	-0.0823	0.5250	0.0205		0.2251	0.8244
3	9（再去 X_6 ）	0.1761	0.0840	-0.0301	0.0309	0.0101	0.0328		-0.0844	0.5443	0.0053		0.2311	0.8239
4	8（再去 X_9 ）	0.1761	0.0845	-0.0300	0.0307	0.0100	0.0330		-0.0864	0.5508			0.2313	0.8239
5	7（再去 X_4 ）	0.1836	0.0860	-0.0200	0.0302		0.0229		-0.0661	0.5291			0.2344	0.8164
6	6（再去 X_5 ）	0.1997	0.0927	-0.0165	0.0230				-0.0486	0.5460			0.2036	0.8003
7	5（再去 X_3 ）	0.2074	0.1236	-0.0020					-0.0534	0.5429			0.1814	0.7926
8	4（再去 X_2 ）	0.2076	0.1242						-0.0543	0.5415			0.1810	0.7924
9	3（再去 X_7 ）	0.2328	0.1126							0.3986			0.2560	0.7672

X_2 、 X_7 。最后剩余 X_1 、 X_8 和 X_{11} ，将其对 Y 进行通径分析，结果显示 X_8 对 Y 的影响最大。

综上可得，11 个性状指标的变化对产量影响的敏感性为单盘粒重 > 结实率 > 株高 > 百粒重 > 茎粗 > 叶片数 > 籽粒长 > 单盘直径 > 单盘粒数 > 籽粒宽 > 籽仁率。

3 讨论

3.1 食用向日葵产量通径分析

张雷等^[20]研究产量与性状因子的相关关系结果与本文有不同之处，其认为产量受到多个基因的控制，外在因素对产量影响也极大，如生长环境、土壤状况等。明确塔额盆地食用向日葵高产影响因素的主次关系对推动育种工作有关键作用。但目前已有相关研究^[21]结果有一定分歧。本试验分析表明，产量与各性状指标均存在一定的相关性，但对产量的影响不同。对产量形成具有较大影响的指标有单盘粒重、结实率和株高，三者直接作用和间接作用均较强；以直接作用影响产量的性状指标有叶片数和单盘直径，两者间接作用影响微弱。本文与 Habib 等^[22]的研究结果基本一致，茎粗和百粒重对产量的作用为负值，但可以通过其他性状指标的间接作用实现对产量的正相关，这与张进帅等^[23]研究结果相似，部分性状指标可以通过其他指标的间接作用形成对产量较大的正相关。对产量影响较小的指标为籽仁率，它的直接和间接作用都较小，说明籽仁率性状基因型不是直接对食用向日葵产量起作用。

3.2 食用向日葵产量敏感性分析

性状指标对产量的直接和间接系数会随着指标数量的不同而变化，决定系数也同样发生变化。不同性状对产量的敏感性不同，其中，敏感性最高的性状指标有单盘粒重、结实率和株高；对产量低敏感性的性状指标为籽仁率、籽粒宽和单盘粒数。误差项对产量的相对系数较小，也说明影响产量的主要因子在选择性状指标之内，且对产量敏感性分析的误差较小，证明该分析法在不同性状指标对食用向日葵产量的影响关系上的可行性。王佰众等^[24]研究表明，单盘粒数和盘径对产量的直接影响较小甚至是负效应，本试验结果与其一致，发现单盘粒数和单盘直径对 R^2 的贡献率及直接作用系数较低。前人^[25]研究显示，百粒重、花盘直径和结实率对产

量有较大影响且能显著提高产量，对产量的敏感性高，百粒重和结实率与本试验研究结果基本一致，本试验中结实率和百粒重对产量的敏感性分别排第 2 和第 4 位，但单盘直径对产量敏感性低，直接作用表现较弱。这可能是由于品种特性及生长环境不同。食用向日葵产量不仅受内在遗传因素的影响，同时也受外在因素（如环境、土壤、气象等）影响。因此，今后将进一步结合外在因素方面做深入研究。

4 结论

综上分析表明，食用向日葵品种中，单盘粒重、结实率、株高和百粒重的提高能够有效提高产量。因此，试验明确育种方向要以这 4 个性状为主。根据育种目标需求不同可再选择其他性状指标，将产量及其构成因素平衡协调至最佳水平，最终提高食用向日葵产量。

参考文献

- [1] 崔良基. 向日葵栽培生理与栽培技术. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [2] 焦玉字, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 不同向日葵品种对镉积累差异性的田间研究. 作物杂志, 2018(6): 89-95.
- [3] 包海柱, 高聚林, 马庆, 等. 油用向日葵主要农艺性状的遗传效应及相关性研究. 西北植物学报, 2012, 32(9): 1736-1744.
- [4] 王兴珍, 贾秀苹, 梁根生, 等. 食用向日葵杂交种主要农艺性状与产量的相关性分析. 甘肃农业科技, 2018(11): 1-5.
- [5] 李丹, 赵存鹏, 刘素恩, 等. 39 份油用向日葵杂交种主要农艺性状与产量的多元分析. 华北农学报, 2023, 38(增 1): 154-160.
- [6] 李慧琳, 向依, 于二汝, 等. 贵州食葵种质资源农艺性状主成分和聚类分析. 种子, 2022, 41(12): 98-105.
- [7] 纪洪亭, 王勇, 赵韩伟, 等. 基于多元统计方法的江苏食用向日葵主要农艺性状综合评价. 江苏农业科学, 2021, 49(22): 105-109.
- [8] 苏飞燕, 石慧敏, 伊六喜, 等. 油用向日葵产量及农艺性状的分析. 分子植物育种, 2023, 21(5): 1693-1700.
- [9] 朱东旭, 关中波, 徐桂真, 等. 油用向日葵品种主要农艺性状的主成分分析和聚类分析. 中国农学通报, 2015, 31(12): 152-156.
- [10] 梁春波. 油用向日葵杂交组合子实含油率与农艺性状的相关及通径分析. 安徽农业科学, 2018, 46(33): 19-20, 24.
- [11] 梁春波. 油用向日葵杂交种(组合)主要农艺性状与单株产量的相关及通径分析. 黑龙江农业科学, 2016(12): 23-27.
- [12] 尹海峰, 白苇, 王宽, 等. 食葵主要数量性状的相关遗传力及通径分析. 辽宁农业科学, 2017(2): 23-25.
- [13] 罗静静, 王贺亚, 艾海峰, 等. 塔额垦区食用向日葵产量与主要经济性状关系的分析. 安徽农业科学, 2022, 50(22): 15-18.
- [14] 王贺亚, 孟玲, 李怀胜, 等. 塔额垦区甘蓝型油菜主要性状与产量的相关性通径分析. 种子, 2023, 42(4): 127-132.
- [15] 王培刚, 梁静, 张刚鸣. 多元统计分析与 SAS 实现. 武汉: 武汉大学出版社, 2020.
- [16] 王亚许, 孙洪泉, 吕娟, 等. 基于 APSIM 模型的春玉米生育

- 期旱灾损失敏感性定量分析. 灾害学, 2021, 36(2): 30-36.
- [17] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
- [18] 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90.
- [19] 王连喜, 张阳, 李琪, 等. 作物模型参数敏感性分析现状与展望. 气象科技, 2018, 46(2): 382-389.
- [20] 张雷, 宋宝军, 于学鹏, 等. 食用向日葵产量与主要性状相关及通径分析. 黑龙江农业科学, 2010(9): 46-49.
- [21] 刘庆鹏, 张玮, 薛伟, 等. 油用向日葵杂交种主要性状与产量间的灰色关联分析. 北方农业学报, 2016, 44(1): 12-14, 18.
- [22] Habib H, Mehdi S S, Rashkf A, et al. Genetic association and path analysis for seed yield in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2006, 43: 136-140.
- [23] 张进帅, 黄翠红, 王慧, 等. 水稻单株产量相关性状的的相关性及其通径分析. 江苏农业科学, 2019, 47(18): 108-113.
- [24] 王佰众, 李玉发, 刘红欣, 等. 食用向日葵产量及主要性状相关与通径分析. 现代农业科技, 2014(22): 18-19.
- [25] 王启杰, 王鹏, 刘胜利, 等. 新疆向日葵品种产量敏感性分析. 中国油料作物学报, 2023, 45(5): 972-979.

Yield Sensitivity Analysis of Edible Sunflower Varieties in Ta'e Basin

Wang Heya, Luo Jingjing, Meng Ling, Ai Haifeng, Wang Bin,
Li Huaisheng, Xu Jingpeng, Xu Xiangyang

(Institute of Agricultural Sciences, Ninth Division of Xinjiang Production and Construction
Corps (Institute of Animal Husbandry Science), Tacheng 834700, Xinjiang, China)

Abstract In order to ensure the high yield of edible sunflower in Ta'e basin, and explore the yield sensitivity of edible sunflower, the related traits affecting yield were investigated during the growth period. The 27 varieties of edible sunflower in Xinjiang were selected, and the genetic correlation and path coefficient between 11 main traits and yield were analyzed. The results showed that the four trait variables of grain weight per head, seed-setting rate, plant height and 100-grain weight were significantly correlated with yield, and the direct effect coefficients of yield were 0.7082, 0.2742, 0.2039 and -0.3381, respectively and the indirect effect coefficient was between -0.1999 and 0.5935. Path analysis further conducted on the basis of genetic correlation analysis showed that the three variables most sensitive to yield were grain weight per head, seed-setting rate and plant height. The traits with low sensitivity to yield included seed kernel rate, grain width and number of grains per head. As a result, it is preliminarily concluded that in the breeding of edible sunflower, varieties with heavy grain weight per head, high seed-setting rate, and suitable plant height must be chosen in order to ensure high yield. Other traits should be taken into consideration, and the relationships among various traits must be coordinated.

Key words Ta'e basin; Edible sunflower; Yield; Sensitivity; Path analysis