

**ВИЗУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
АГРОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ У ОБРАЗЦОВ САФЛОРА
(*Carthamus tinctorius* L.) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ
ГЕНОТИП—ГЕНОТИП×СРЕДА (ACCESSION BY TRAIT BIPLLOT)**

N. SABAGHNIA[✉], M. JANMOHAMMADI, M. NOURAEIN

Сафлор (*Carthamus tinctorius* L.) — масличная культура, известная как одна из старейших выращиваемых в полусасушливых регионах. В этой работе 100 образцов сафлора исследованы в схеме альфа-решетки (10×10) с двумя повторениями в течение двух лет выращивания. Выполнены измерения морфологических, агрономических показателей, характеристик урожайности и воспроизводства урожая семян. Модель AT-biplot подобрана для выявления структуры взаимодействия признаков и объяснила 60 и 66 % наблюдаемых вариаций соответственно для 1-го и 2-го годов наблюдений. В 1-й год построен векторный девятиугольник, в котором образец 28 продемонстрировал преимущества по сравнению с другими образцами по высоте первой корзинки, урожайности семян и индексу урожая, причем восьмиугольник, сформированный по данным 2-го года, также выявил преимущества образца 28 по высоте растения, высоте первой корзинки, урожайности семян и индексу урожая. Графы с векторами признаков позволили обнаружить положительные связи между урожайностью семян и индексом урожая в оба года. Графы с обозначением идеального генотипа показали, что образцы 30, 33, 39, 45 и 93 из Ирана, образцы 72 и 83 из Канады, образец 58 из США и образец 28 неизвестного происхождения выделяются как лучшие идеальные образцы. Высота растения и диаметр стебля были более желательными признаками и имели самый высокий репрезентативный и дискриминантный потенциал для скрининга образцов сафлора. Что касается результатов обоих лет, можно сделать вывод, что образцы 7 (из Ирана), 28 (неизвестное происхождение) и 33 (из Ирана) имели хороший потенциал по урожайности семян в течение двух лет, поэтому они являются хорошими кандидатами для дальнейшего анализа и получения сортов для полусасушливых регионов.

Ключевые слова: векторный график, многоугольный график, идеальный образец, идеальный признак.

Среди древних окультуренных форм сафлор (*Carthamus tinctorius* L.) идентифицируется как важное масличное растение из семейства сложноцветных (*Asteraceae*), это самоопылитель с небольшой долей перекрестного опыления, которое описано у разных видов. Семена сафлора богаты железом, фосфором, кальцием и витамином А, отмечается засухоустойчивость сафлора и высокое качество сафлорового масла со средним содержанием в семенах около 25-30 % (1). Кроме того, важное значение имеет медицинское и промышленные применения сафлора. Сафлор возник в средиземноморских районах Западной Азии и распространился в разных регионах, на Ближнем Востоке сафлор выращивали в течение многих лет. Иран известен как один из основных центров происхождения сафлора, и, по-видимому, именно в Иране накоплен богатый запас зародышевой плазмы этого растения (2). Исследование генетического разнообразия культурных и диких видов — одно из научных направлений по выявлению генетической емкости признаков растения и защите генетических ресурсов. Изучение генетической изменчивости у разных видов и управление генетическими ресурсами позволяет использовать их в разнообразных программах по сохранению и улучшению сельскохозяйственных культур.

Уничтожение местных популяций растений и создание однородных сортов приводит к снижению генетического разнообразия и усилению процессов генетической эрозии. Поэтому важно оценивать разнообразие видов растений для поддержания генетических ресурсов и их обоснованного практического использования (3). Оценка генетического разнообразия линий в различных географических регионах дает ценную информацию о сохранении и воспроизводстве неповрежденной зародышевой плазмы, доступной в

каждом регионе исследователям, чтобы использовать это разнообразие для увеличения эффективности качественных и количественных признаков и повышения урожайности. Сафлор имеет прямые корни, которые могут проникать в почву на глубину до полутора метров и способны выдерживать стресс засухи. Стебель растения имеет первичные, вторичные и третичные ветви, на конце каждой находится цветущая головка с большим числом цветков (4). Цветы могут быть белыми, желтыми, оранжевыми или красными. Плод имеет форму семянки, содержащей масло.

Экономическая урожайность сафлора определяется двумя факторами — семенной продуктивностью и содержанием масла в семенах. Однако несмотря на все преимущества сафлора, такие как высокое качество масла и устойчивость к засухе, короткий жизненный цикл и приспособленность к различным режимам посадки в течение вегетационного периода, урожайность культуры относительно низкая. В Иране она составляет примерно 1300 кг/га, в мире в среднем — 950 кг/га, в то время как самая высокая урожайность для Мексики, Таджикистана и Китая — 2000, 1600 и 1500 кг/га (5). Первый шаг в селекции сафлора — получение популяций с высоким разнообразием, чтобы можно было провести необходимый внутривидовой отбор. Выбор желательных генотипов и определение взаимосвязей между признаками дают селекционерам возможность использовать наиболее подходящее соотношение характеристик для высокой продуктивности. Успех выращивания сафлора будет зависеть от селекционных программ, обеспечивающих повышение урожайности и содержания масла, контролируемых аддитивными, доминантными и эпистатическими эффектами (6). Некоторые исследователи сафлора пытались идентифицировать и использовать такие признаки, сосредоточившись на агрономических, морфологических и фенологических особенностях сафлора.

Доказано, что существует прямая или косвенная связь между многими морфологическими признаками и урожайностью семян сафлора, поэтому, применив соответствующие методы селекции, можно увеличить его урожайность (7, 8). М. Bahmanfar с соавт. (9) предложили в качестве эффективных индексов отбора на повышение урожайности использовать такие важные признаки сафлора, как диаметр корзинки, число корзинок на растении и масса 1000 семян. С.М. Minnie с соавт. (10) при оценке генетической изменчивости среди 70 генотипов сафлора обнаружили высокую положительную корреляцию урожайности семян с числом семян на корзинку, а также с числом суток до цветения и созревания. J.P.E Lira с соавт. (11) определили, что число корзинок на растении и высота растения — признаки с наибольшим влиянием на генетическое разнообразие сафлора. В работе М. Rahimi (12) на основе изучения 30 образцов сафлора, произраставшего в теплых засушливых условиях, показано, что оценка зародышевой плазмы по морфологическим признакам может предоставить селекционерам полезную информацию, а образцы с высокой урожайностью семян имели умеренные по длительности сроки до цветения и созревания. Н. Ebrahimi с соавт. (13), оценив 81 образец сафлора, выявили положительную корреляцию урожайности с числом семян в главной корзинке и выделили три образца как наиболее перспективные по урожайности.

Нашей целью было определение степени изменчивости образцов сафлора по некоторым морфологическим признакам в полусушливых горных климатических условиях для последующего использования в селекционных программах, а также выявление взаимосвязей между морфологическими признаками и графической группировкой образцов на основе модели генотип—генотип×среда (accession by trait (AT) biplot).

Методика. Исследовали 100 образцов сафлора (Plant Gene Resources of Canada и Seed and Plant Improvement Institute of Iran) из разных географических регионов. Данные получали при выращивании на ферме в эксперименте по схеме альфа-решетки (10×10) с двумя повторениями в течение 2 лет (University of Maragheh, Иран). В регионе (высота над уровнем моря 1485 м) холодный полусухой высокогорный климат со средним количеством осадков 320 мм. Семена выращивали в четыре ряда длиной 2 м с интервалом 0,25 м и 10 см между растениями. Экспериментальные участки увлажняли с помощью искусственного орошения через 1 сут после начала выращивания, а затем каждые 10 сут. Перед посевом в почву вносились необходимые химические удобрения (N₆₀P₃₀K₂₀ кг/га) для компенсации низкого содержания органического вещества. В эксперименте применяли местные стандартные методы культивирования, включая борьбу с сорняками и вредителями.

Набор данных регистрировали по фенотипическим признакам у 10 случайно выбранных растений каждого участка, определяя высоту растения (PH), число корзинок на ветвь (NCB), высоту первой боковой ветви (HFL), диаметр стебля (SD), высоту первой корзинки (HFC), число ветвей (NB), число корзинок на растение (NCP), массу корзинки (WC) и число семян на корзинку (SNC). После созревания растения центральных рядов экспериментальных единиц собирали и взвешивали для определения биологической урожайности, а затем использовали для определения урожайности семян (SY). Индекс урожая (HI) рассчитывали, как соотношение SY к биологической массе, массу 1000 семян (TSW) измеряли на 3-кратной случайной выборке. Из-за поражения вредителями в 1-й год исключили пять образцов, в результате чего данные были зарегистрированы только для 95 образцов, тогда как на 2-й год в испытании участвовали все 100 образцов.

Результаты оценивали с помощью критерия нормальности Андерсона-Дарлинга (the Anderson-Darling normality test), используя программное обеспечение MINITAB 14.0 («Minitab, Inc.», США). Для изучения структуры образцов по модели accession by trait (AT) biplot, а также для графического представления результатов применили предложенный W. Yan и J. Frégau-Reid (14) метод выбора генотипов по урожайности на основе нескольких признаков — двухплоскостной график, отражающий связь урожайности генотипа с признаком (GYT), где признаком может быть любая цель селекции, отличная от урожайности. Метод основан на анализе главных компонент (PCA) и симметричном масштабировании полученных оценок образцов и признаков с помощью уравнения:

$$\frac{g_{ij}-t_j}{s_j} = \sum_{n=1}^2 \lambda_n \xi_{in} \eta_{jn} + e_{ij},$$

где g_{ij} — значение для образца i признака j , t_j — среднее значение образцов по признаку j , s_j — квадратный корень дисперсии для признака j , λ_n — собственное значение для PCA _{n} , ξ_{in} — значение для образца i на PCA _{n} , η_{jn} — значение для признака j на PCA _{n} , e_{ij} — ошибка. Опцию Scaling = 1 использовали для получения масштабированных данных с помощью квадратного корня дисперсии для образцов с разными признаками; опцию Centering = 2 — для получения центрированных данных по средним значениям признаков. Кроме того, опция singular value decomposition (SVP) = 2 использовалась для сингулярных оценок, которые были категоризированы в собственные векторы признаков, что позволяет визуально интерпретировать их ассоциации по векторам в пространстве AT-biplot. Наконец, на

основании сингулярных оценок при $SVP = 1$ получали собственные векторы образцов, чтобы визуально интерпретировать их ассоциации с идеальным образцом в графическом пространстве AT-biplot. Графы AT-biplot строили в приложении GGEbiplot (15).

Результаты. Исследованные образцы сафлора представлены в таблице 1.

1. Происхождение образцов сафлора (*Carthamus tinctorius* L.), изученных в работе

Образец	Происхождение	Образец	Происхождение	Образец	Происхождение
G1	Неизвестно	G35	Иран	G68	Канада
G2	Неизвестно	G36	Иран	G69	Канада
G3	Иран	G37	Неизвестно	G70	Канада
G4	Неизвестно	G38	Неизвестно	G71	Канада
G5	Турция	G39	Иран	G72	Канада
G6	Неизвестно	G40	Неизвестно	G73	Канада
G7	Иран	G41	Иран	G74	Канада
G8	Неизвестно	G42	США	G75	Канада
G9	Неизвестно	G43	Неизвестно	G76	Канада
G10	Иран	G44	Палестина	G77	Канада
G11	Иран	G45	Иран	G78	Канада
G12	Неизвестно	G46	Турция	G79	Канада
G13	Португалия	G47	Неизвестно	G80	Канада
G14	Иран	G48	Иран	G81	Канада
G15	Неизвестно	G49	Китай	G82	Канада
G16	Иран	G50	Неизвестно	G83	Канада
G17	Неизвестно	G51	Неизвестно	G84	Канада
G18	Иран	G52	Неизвестно	G85	Канада
G19	Турция	G53	Египет	G86	Иран
G20	Сирия	G54	Иран	G87	Иран
G21	Иран	G55	США	G88	Иран
G22	Неизвестно	G56	Неизвестно	G89	Иран
G23	Кипр	G57	Иран	G90	Иран
G24	Иран	G58	США	G91	Иран
G25	Мексика	G59	Неизвестно	G92	Иран
G26	США	G60	Иран	G93	Иран
G27	Пакистан	G61	Иран	G94	Иран
G28	Неизвестно	G62	Неизвестно	G95	Иран
G29	Франция	G63	Иран	G96	Иран
G30	Иран	G64	Неизвестно	G97	Иран
G31	США	G65	Канада	G98	Иран
G32	США	G66	Канада	G99	Иран
G33	Иран	G67	Канада	G100	Иран
G34	Иран				

Примененная модель AT-biplot выявила 60 и 66 % вариации в наборе данных соответственно для 1-го и 2-го года (рис. 1), что указывает на относительно сложную схему взаимодействий между образцами и признаками сафлора. AT-biplot модель может эффективно исследовать общую схему взаимодействия образцов по признакам. Метод ANOVA необходим для решения о том, должна ли (и каким образом) переменная вовлекаться в целевой статистический анализ (16). Статистическая значимость взаимодействия требует применения AT-biplot модели, тогда как для незначимых взаимодействий AT-biplot анализ несущественен. Результаты ANOVA подтвердили высокую степень изменчивости среди образцов и признаков сафлора и применимость AT-biplot модели для их анализа.

Инструмент полигонального просмотра демонстрирует, как AT-biplot модель может облегчить сравнение образцов на основе признаков и определить те образцы, которые в том или ином отношении превосходят остальных, становясь кандидатами для использования в селекции или сортами, рекомендуемыми в качестве лучших для производителей сафлора. В 1-й год граф имел вид девятиугольника с перпендикулярами к его сторонам, что облегчает сравнение между вершинными образцами, в частности

7, 25, 28, 33, 36, 72, 74, 96 и 97 (рис. 1, А).

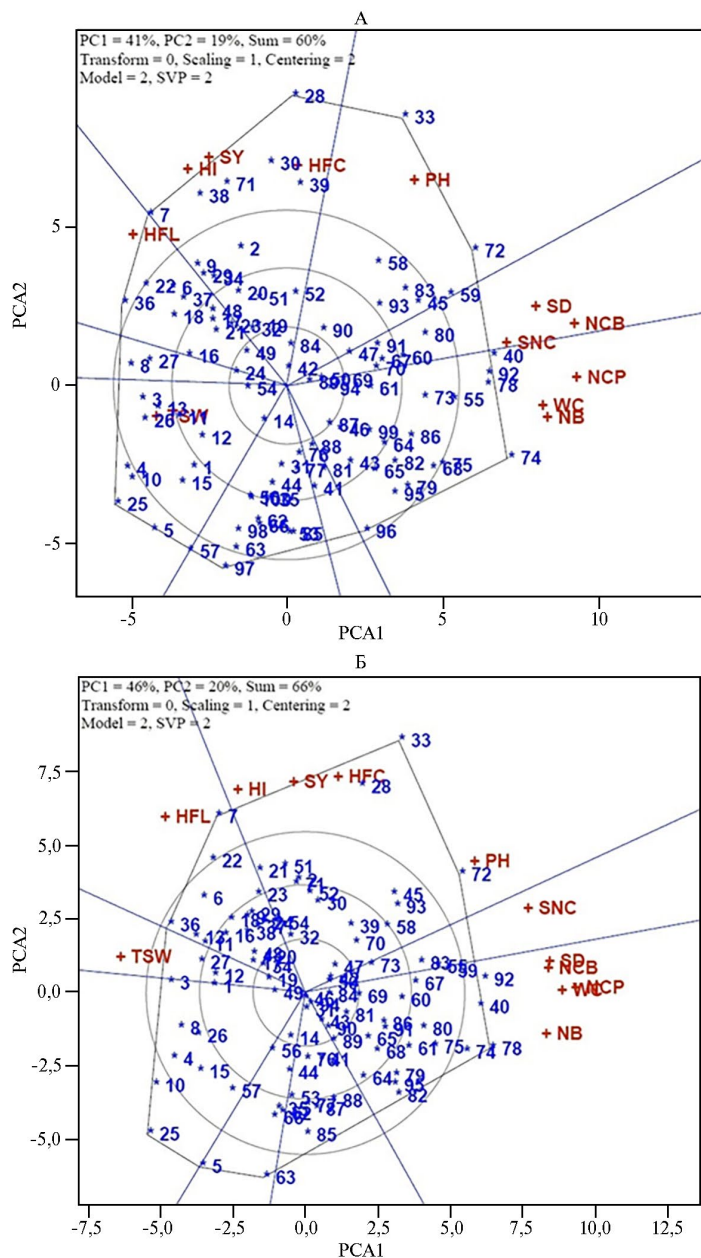


Рис. 1. Визуализация распределения образцов сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) по секторам признаков в системе координат PCA на основе статистической модели ascrssion-by-trait (AT) biplot в 1-й (А) и 2-й (Б) годы тестирования: признаки — PH (высота растения), HFL (высота первой боковой ветви), HFC (высота первой корзинки), SD (диаметр стебля), NB (число ветвей), NCB (число корзинок на ветвь), NCP (число корзинок на растении), SNC (число семян на корзинку), WC (масса корзинки), SY (урожайность семян), HI (индекс урожая), TSW (масса 1000 семян) (University of Maragheh, Иран).

Образец 28 выделился превосходными показателями по HFC, SY и HI, образец 7 — лучшим значением HFL, а образец 33 — показателем PH в 1-й год (см. рис. 1, А). Кроме того, образец 72 продемонстрировал превосходные показатели по SD, SNC и NCB, образец 74 — лучшие значения NCP, WC и NB, а образец 25 — лучшее значение TSW в 1-й год (см. рис. 1, А). Хотя модель AT-biplot может неточно отображать средние значения

признаков для образцов, поскольку не охватывает всю дисперсию набора данных, она дает общее представление о базовых свойствах структуры данных. Три оставшихся вершинных образца (36, 96 и 97) не показали оптимальных результатов ни для одного из измеренных признаков, поскольку образцы на графе не попали в сектор для этих признаков в 1-й год (см. рис. 1, А). Некоторые основные элементы урожайности сафлора, например число корзинок на растение, число семян на корзинку и масса 1000 семян, показали отрицательные связи, поэтому по ним возможен только непрямой отбор (17). Таким образом, элементы структуры урожая у сафлора способны проявлять влияние независимо друг от друга, и попытка повысить значение одного элемента может привести к снижению показателей по другим.

Полигональное представление AT-biplot модели для 2-го года имело вид восьмиугольника (см. рис. 1, Б) с образцами 5, 7, 25, 33, 36, 63, 72 и 78 в вершинах. Во 2-й год образец 33, следующий за образцом 28, продемонстрировал высокие результаты по HFC, SY, HI и PH, образец 7 — лучшие показатели по HFL, образец 72 — по SNC (см. рис. 1, Б). Кроме того, во 2-й год образец 78, следующий за образцом 74, имел превосходные значения SD, NCB, NCP, WC и NB, а образец 36 — лучший показатель TSW (см. рис. 1, Б). Однако на 2-й год три вершинных образца (5, 25 и 63) были расположены в неблагоприятных секторах признаков или в нежелательных позициях в пределах благоприятных секторов (см. рис. 1, Б), что делает их неподходящими кандидатами для рекомендаций по любым изученным нами признакам сафлора. Что касается всего периода наблюдений, то очевидно, что пять вершинных образцов (7, 25, 33, 36 и 72) повторялись в течение 2 лет испытаний с относительно теми же оценками признаков. Эти желательные образцы показали низкое взаимодействие генотипа с окружающей средой (GE), и их ответы на годовые вариации условий были относительно постоянными. Согласно AT-biplot модели, если она адекватно оценивает вариацию набора данных, образцы, попадающие на ту же сторону перпендикулярной линии, что и любой целевой признак (например, урожайность семян), должны показывать результаты выше средних, тогда как те, что на противоположной стороне, должны показывать результаты ниже средних. Таким образом, в течение двух лет образцы сафлора 2, 23, 30, 32, 39 и 71 имели более высокую урожайность семян, чем другие, при этом эффект взаимодействия генотип×среда GE отсутствовал или был низким. Н. Ebrahimi с соавт. (13) у 64 генотипов сафлора AT-biplot методом выявили признаки с 73 % объясняемой изменчивости и описали 11 вершинных генотипов. Значимые секторы признаков (13) были аналогичны полученным нами в настоящем исследовании, а урожайность, масса 1000 семян, высота растения, число корзинок на растение и число семян на корзинку были выделены в отдельные секторы.

Для изучения основных элементов структуры урожая строят векторы от центральной точки графа к признаку. Это облегчает визуализацию ассоциаций и применимо при условии, что соответствующая модель охватывает приемлемое число вариаций. Ассоциации между двумя признаками оцениваются по косинусу векторов как $\cos 0^\circ = +1$, $\cos 90^\circ = 0$ и $\cos 180^\circ = -1$, и их значимость может быть оценена по длине вектора (длинные векторы соответствуют более высокой степени значимости) (рис. 2).

В 1-й год наиболее выраженными были положительные ассоциации между урожайностью и HI, между числом ветвей (NB) и массой корзинок (WC), между числом семян на корзинку (SNC), числом корзинок на ветви (NCB) и диаметром стебля (SD), как показывают острые углы векторов на графе (см. рис. 2, А). Что касается тупого угла TSW с SD, NB,

NCB, NCP, SNC и WC, то этот признак имел отрицательную связь с упомянутыми признаками в 1-й год (см. рис. 2, А).

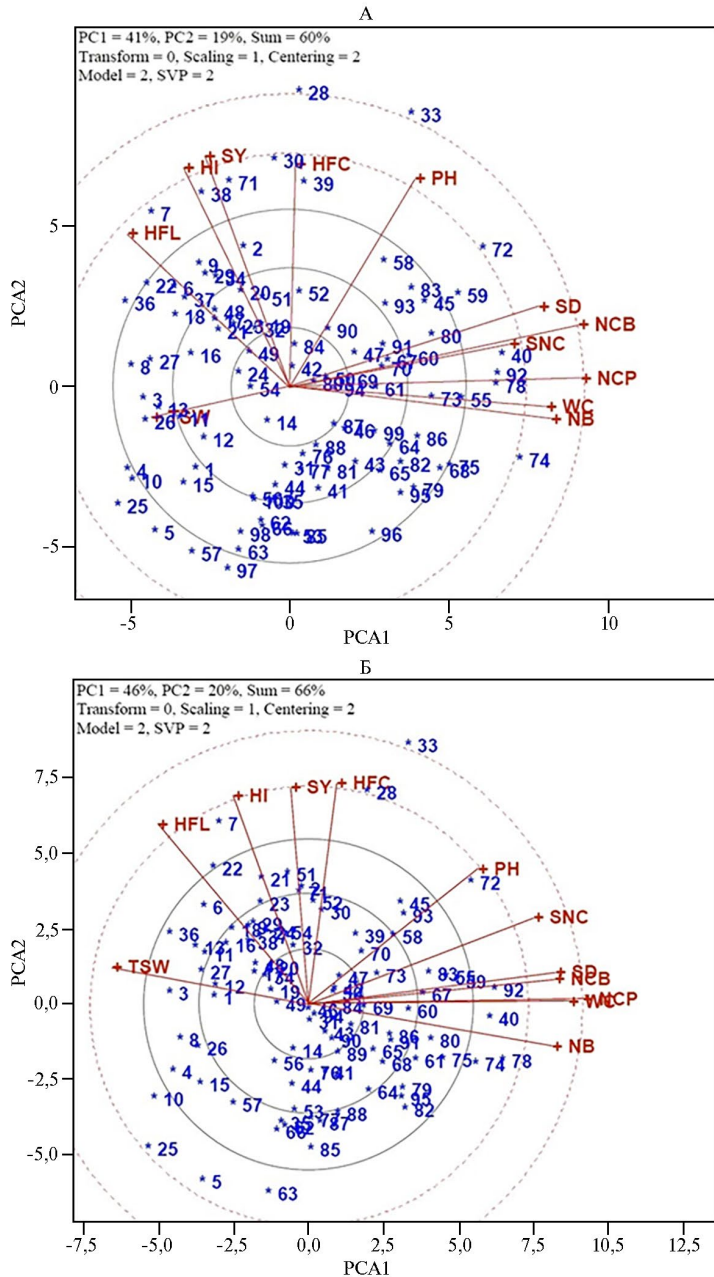


Рис. 2. Визуализация распределения образцов сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) относительно векторов признаков в системе координат PCA на основе статистической модели ascrrsion-by-trait (AT) biplot в 1-й (А) и на 2-й (Б) годы тестирования: признаки — PH (высота растения), HFL (высота первой боковой ветви), HFC (высота первой корзинки), SD (диаметр стебля), NB (число ветвей), NCB (число корзинок на ветвь), NCP (число корзинок на растение), SNC (число семян на корзинку), WC (масса корзинки), SY (урожайность семян), HI (индекс урожая), TSW (масса 1000 семян) (University of Maragheh, Иран).

Кроме того, относительно близкие к нулю ассоциации наблюдались у HFC с TSW, у HFC с WC и NB, у SY и HI с SNC, NCB и SD, о чем свидетельствуют почти перпендикулярные векторы в 1-й год (см. рис. 2, А). Таким образом, AT-biplot модель визуально очертила ассоциации

признаков у растений сафлора, что совпало с выводами других исследователей. Так, М. Janmohammadi с соавт. (18) сообщили о положительной связи между урожайностью семян и индексом урожая у сафлора, а М. Fattahi с соавт. (19) отметили высокую положительную корреляцию между числом корзинок на ветвь и числом семян на корзинку.

На 2-й год (см. рис. 2, Б) были выявлены положительные связи урожайности семян с HFC и HI, а также NB, NCP, WC, NCB с SD, на что указывают острые углы векторов. Тупой угол вектора TSW с NB, NCP, WC, NCB и SD означает, что TSW имел отрицательную связь с упомянутыми признаками во 2-й год (см. рис. 2, Б). Относительно близкие к нулю корреляции были отмечены во 2-й год между TSW и HFC, между PH и HFL, между HFC и NB, а также между SY, NCP, WC, NCB и SD, о чем свидетельствуют почти перпендикулярные векторы (см. рис. 2, Б). Сообщалось о близкой к нулю корреляции между TSW и числом корзинок на растение, между урожайностью семян и массой 1000 семян, а также между числом корзинок на растение и урожайностью семян сафлора (13). С этим контрастируют данные (20), что число корзинок на растение и TSW относятся к основным характеристикам сафлора из-за их связи с урожайностью, но такие положительные связи не были выявлены в этом исследовании. Относительное большинство упомянутых ассоциаций можно подтвердить на основе корреляционной матрицы 1-го (табл. 2) и 2-го года (табл. 3) испытаний, однако точных соответствий между графическими и числовыми результатами ожидать не следует, поскольку AT-biplot модель объясняет ассоциации между признаками на основе общей структуры данных, тогда как коэффициенты Пирсона объясняют исключительно связь между двумя признаками, и подобранная нами модель описывает 60 и 66 % (соответственно для 1-го и 2-го года), а не 100 % наблюдаемой изменчивости.

2. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) признаков у растений сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) в 1-й год испытаний (University of Maragheh, Иран)

Признак	PH	HFL	HFC	SD	NB	NCB	NCP	SNC	WC	TSW	HI
HFL	-0,03										
HFC	0,57	0,58									
SD	0,66	-0,39	0,23								
NB	0,31	-0,62	-0,12	0,67							
NCB	0,38	-0,36	0,09	0,61	0,67						
NCP	0,49	-0,45	0,07	0,74	0,81	0,85					
SNC	0,45	-0,18	0,21	0,59	0,55	0,65	0,69				
WC	0,38	-0,45	0,00	0,69	0,78	0,75	0,83	0,81			
TSW	-0,43	0,27	-0,12	-0,53	-0,42	-0,54	-0,63	-0,42	-0,45		
HI	-0,04	0,35	0,20	-0,23	-0,18	-0,08	-0,20	0,05	-0,18	0,36	
SY	0,13	0,23	0,24	-0,01	0,00	0,05	-0,01	0,14	0,02	0,29	0,77

Примечание. Признаки — PH (высота растения), HFL (высота первой боковой ветви), HFC (высота первой корзинки), SD (диаметр стебля), NB (число ветвей), NCB (число корзинок на ветвь), NCP (число корзинок на растении), SNC (число семян на корзинку), WC (масса корзинки), SY (урожайность семян), HI (индекс урожая), TSW (масса 1000 семян).

Пороги достоверности корреляций при $p < 0,05$ и $p < 0,01$ и $df = 93$ составляют соответственно 0,20 и 0,25.

3. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) признаков у растений сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) во 2-й год испытаний (University of Maragheh, Иран)

Признак	PH	HFL	HFC	SD	NB	NCB	NCP	SNC	WC	TSW	HI
HFL	-0,01										
HFC	0,41	0,59									
SD	0,60	-0,35	0,23								
NB	0,16	-0,57	-0,16	0,59							
NCB	0,40	-0,35	0,14	0,67	0,72						

NCP	0,32	-0,45	-0,01	0,66	0,86	0,88					
SNC	0,22	-0,08	0,14	0,42	0,40	0,64	0,55				
WC	0,10	-0,41	-0,11	0,49	0,64	0,73	0,69	0,72			
TSW	-0,32	0,03	-0,30	-0,36	-0,13	-0,36	-0,27	-0,30	-0,22		
HI	0,16	0,22	0,13	-0,18	-0,16	-0,12	-0,22	-0,19	-0,19	0,32	
SY	0,24	0,21	0,14	-0,11	-0,11	-0,07	-0,16	-0,11	-0,12	0,32	0,95

Примечание. Признаки — PH (высота растения), HFL (высота первой боковой ветви), HFC (высота первой головки), SD (диаметр стебля), NB (число ветвей), NCB (число головок на ветвях), NCP (число головок на растении), SNC (число семян на головку), WC (масса головки), SY (урожайность семян), HI (индекс урожая), TSW (масса 1000 семян).

Пороги достоверности корреляций при $p < 0,05$ и $p < 0,01$ и $df = 98$ составляют соответственно 0,20 и 0,25.

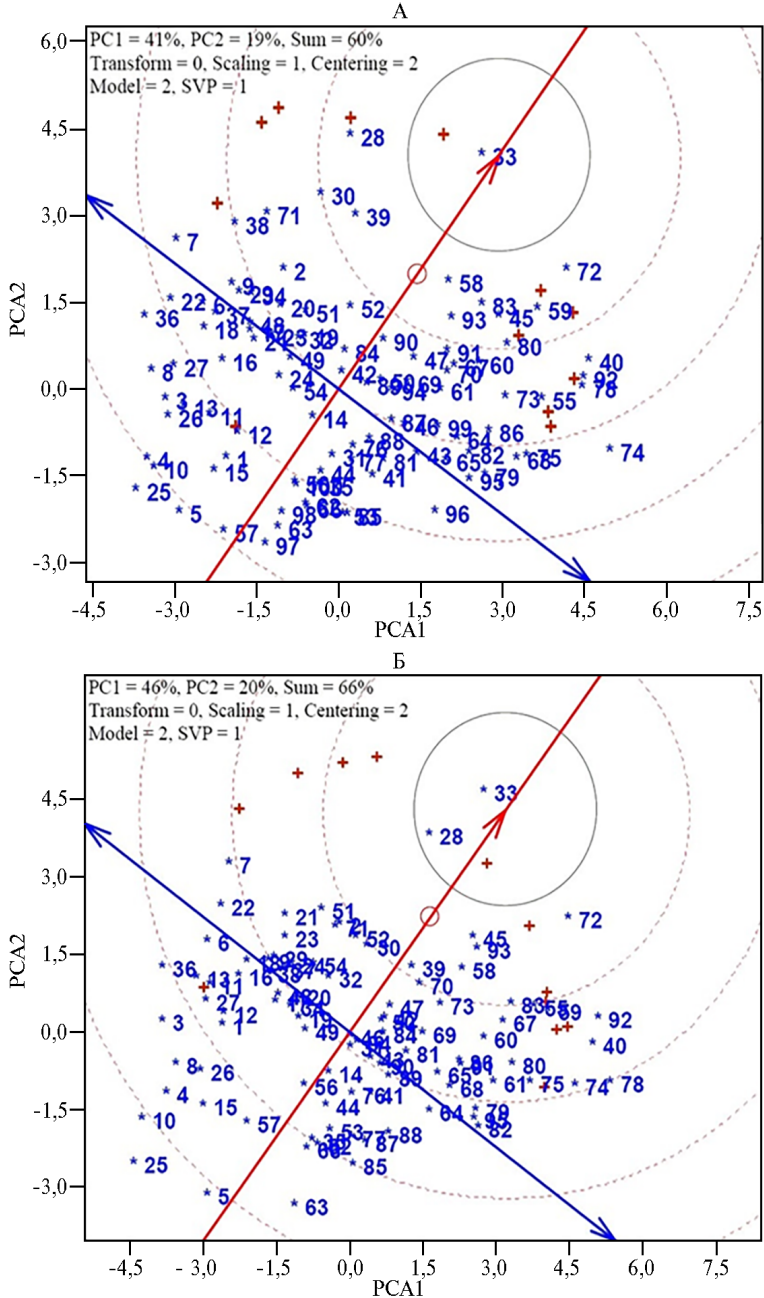


Рис. 3. Идеальный генотип растений сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) (центр кругов) и рас-

пределение образцов в системе координат PCA на основе статистической модели accrssion-by-trait (AT) biplot в 1-й (А) и на 2-й (Б) годы тестирования (University of Maragheh, Иран).

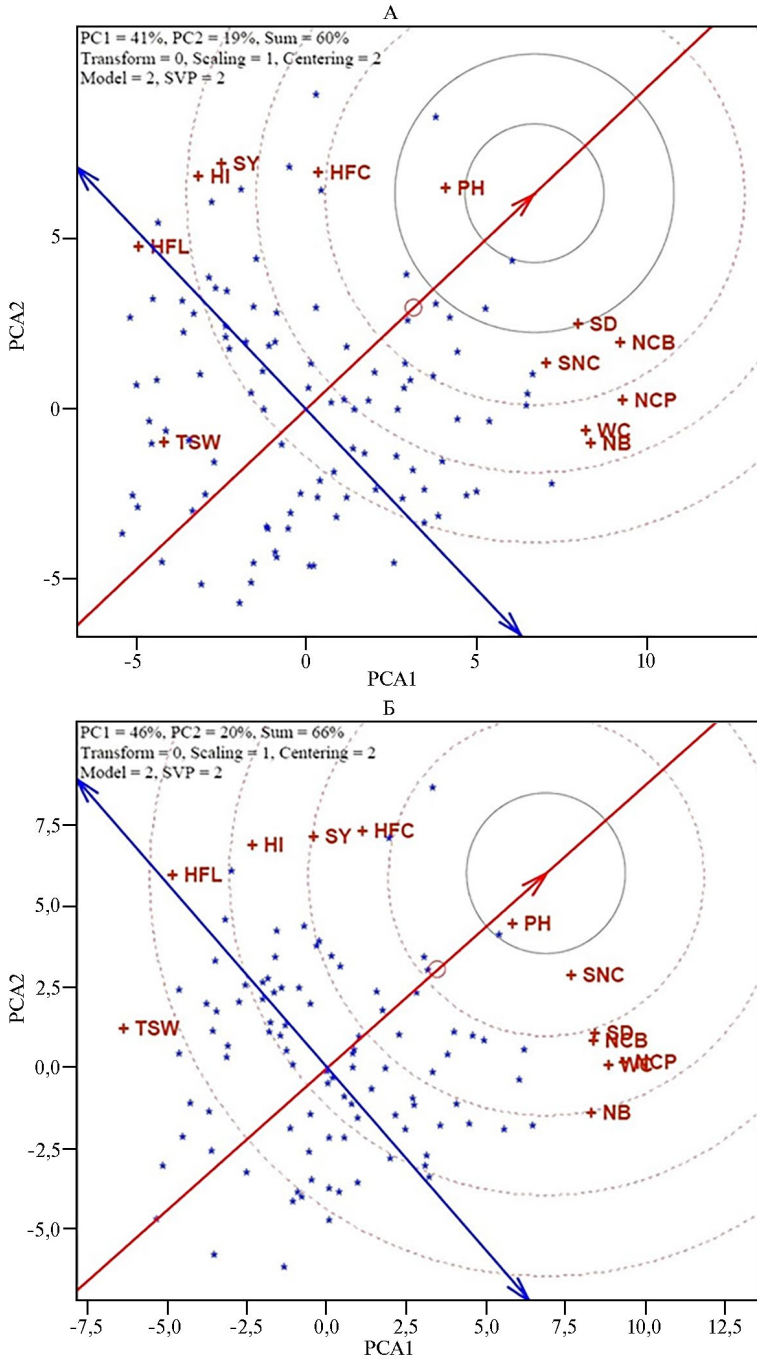


Рис. 4. Представление идеального взаимодействия признаков и их распределение у растений сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) (центр кругов) в системе координат PCA на основе статистической модели accrssion-by-trait (AT) biplot в 1-й (А) и на 2-й (Б) годы тестирования: признаки PH (высота растения), HFL (высота первой боковой ветви), HFC (высота первой корзинки), SD (диаметр стебля), NB (число ветвей), NCB (число корзинок на ветвь), NCP (число корзинок на растение), SNC (число семян на корзинку), WC (масса корзинки), SY (урожайность семян), HI (индекс урожая), TSW (масса 1000 семян) (University of Maragheh, Иран).

На рисунке 3, А центр кругов обозначает местоположение идеального образца, его проекция на вертикальную ось координаты среднего

признака установлена эквивалентной наибольшему вектору среди всех образцов, а проекция на горизонтальную ось координаты среднего признака равна нулю, что означает низкую изменчивость и повышенную надежность проявления признака. Таким образом, чем ближе расположен образец к этому гипотетическому образцу, тем его признаки оптимальнее. Образец 33, а также следующие десять образцов (28, 30, 39, 45, 58, 59, 72, 80, 83 и 93) были ближе всего к положению идеального образца в 1-й год. Худшие образцы располагались на наибольшем удалении от центра (4, 5, 10, 25, 57 и 97) и не позволяли дискриминировать признаки сафлора в 1-й год (см. рис. 3, А). Идеальная область образцов во 2-й год (см. рис. 3, Б) до определенной степени подтвердила результаты 1-го года. Во 2-й год образцы 28 и 33, за которыми следовали образцы 30, 39, 45, 58, 72, 83 и 93, были определены как лучшие, а образцы 4, 5, 10, 25 и 63 — как не представляющие интерес. Сравнение двух лет выделило образцы 30, 33, 39, 45 и 93 из Ирана, 72 и 83 — из Канады, 58 — из США, образец 28 неизвестного происхождения. Очевидно, что большинство идеальных образцов по происхождению были местными сортами, поскольку сафлор возник и исходно культивировался на Ближнем Востоке (21).

Рисунок 4, А иллюстрирует репрезентативный и дискриминантный потенциал признаков, при этом длина вектора служит шкалой дискриминантного потенциала (чем длиннее вектор, тем больше потенциал для различения признака). Длина проекции признака на среднюю координату признака характеризует его репрезентативный потенциал (чем проекция короче, тем потенциал репрезентативности выше). Примечательно, что высота растения (РН), следующая за диаметром стебля (SD), продемонстрировали самый высокий потенциал как репрезентативных, так и дискриминантных возможностей, находясь в идеальном местоположении признака в 1-й год (см. рис. 4, А). NCB и SNC также продемонстрировали высокий репрезентативный и дискриминантный потенциалы. Во 2-й год РН, следуя за SNC, показала самую высокую потенциальную способность репрезентировать и дискриминировать образцы (см. рис. 4, Б). В течение двух лет признаки РН и SNC показали отсутствие привязки к влиянию внешних условий, поэтому скрининг на основе этих двух признаков дает надежные результаты. Число семян на корзинку меньше зависит от условий окружающей среды (22), поэтому для генетического улучшения урожайности семян необходимо использовать этот признак. Кроме того, может быть применен контролируемый отбор, который влияет на урожайность через число семян на корзинку без каких-либо изменений по другим элементам урожайности. Таким образом, у образцов с большой корзинкой и малым числом корзинок больше семян, и они более соответствуют идеальному типу, чем образцы с большим числом корзинок, особенно в полусушливых регионах, поскольку число корзинок на растение больше зависит от окружающей среды (1).

При изучении урожайности семян (SY) по всей выборке стало очевидно, что образцы 7, 28, 30, 33, 38, 39 и 71 продемонстрировали высокое проявление признака в 1-й год (рис. 5, А). Небольшое расстояние образцов 7 и 38 относительно вертикальной оси указывало на низкую изменчивость. Образцы 74, 96 и 97 имели самую низкую урожайность семян в 1-й год (см. рис. 5, А). Тестирование SY во 2-й год показало, что образцы 7, 28 и 33 имели высокий показатель (см. рис. 5, Б), а образцы 5, 25, 63 и 85 — самый низкий. Учитывая результаты обоих лет, можно сделать вывод, что образцы 7 (из Ирана), 28 (неизвестное происхождение) и 33 (из Ирана) сохранили хороший потенциал в течение двух лет, поэтому они

являются хорошими кандидатами для дальнейшего анализа при создании новых сортов.

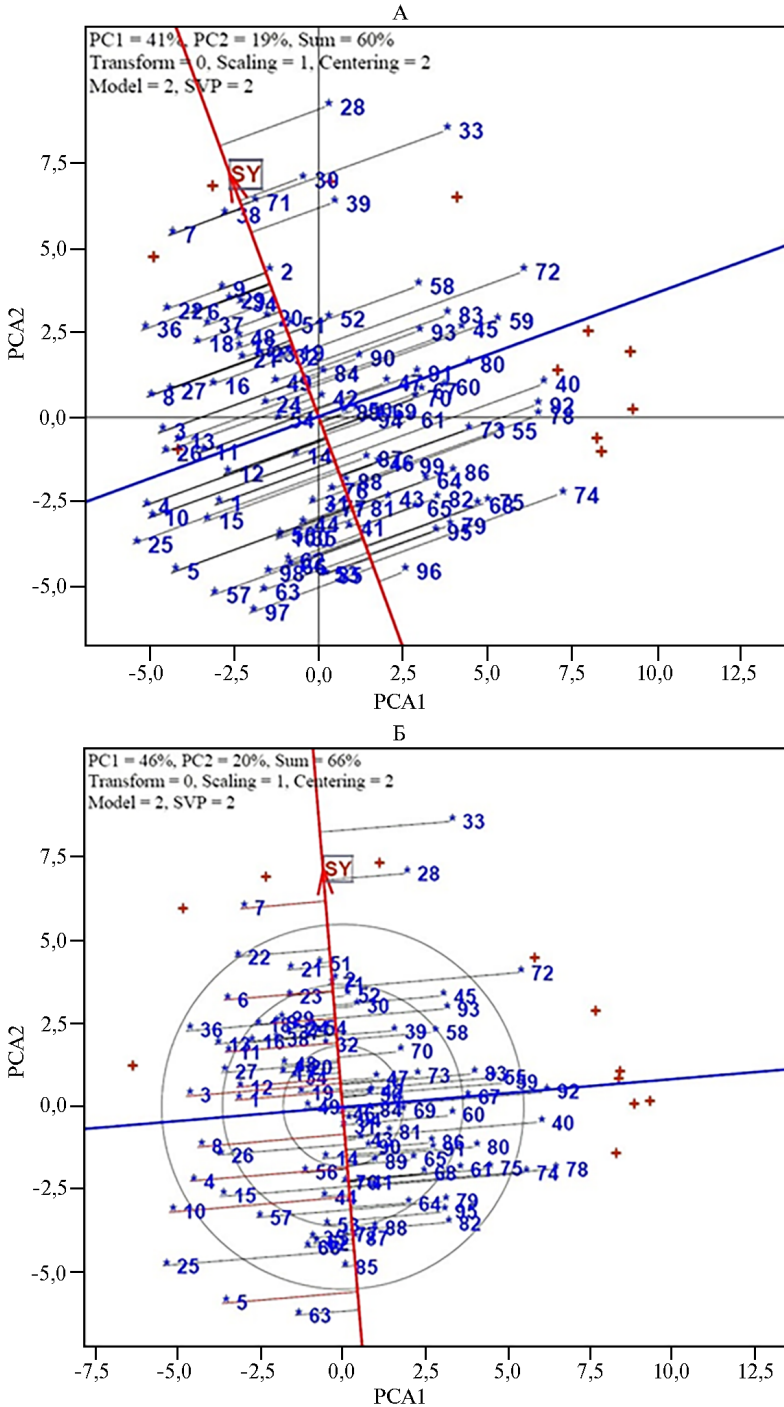


Рис. 5. Тестирование показателей урожайности семян (SY) у образцов сафлора (*Carthamus tinctorius* L.) в системе координат PCA на основе статистической модели accrssion-by-trait (AT) biplot в 1-й (А) и на 2-й (Б) годы (University of Maragheh, Иран).

Два идентифицированных образца (местные сорта или культивгены 7 и 33) были из Ирана, вероятно, поэтому они хорошо приспособлены к климатическим условиям полусухих горных регионов Ирана и пока-

зали низкую зависимость от взаимодействия с окружающей средой. Местные сорта были определены как важный ресурс адаптивности и устойчивости/толерантности к биотическим/абиотическим стрессам (23), но селекционеры следуют краткосрочным целям, поэтому работают с элитным растительным материалом, который может не обладать надлежащей способностью к адаптации или утратить гены адаптивности. Достаточным потенциалом адаптивности обладают местные сорта или культивгены, и их использование в селекционных программах желательно.

В текущем исследовании мы обнаружили значительную корреляцию между урожайностью и индексом урожая. Это соответствует выводам исследования R. Valjani с соавт. (24), которые обнаружили, что выбор наиболее перспективных по урожайности образцов может осуществляться с помощью индекса урожая. Кроме того, изменение таких свойств, как высота растения, высота первой боковой ветви и корзинки, обнаруженное в этом исследовании, было подтверждено F. Ali с соавт. (25). Укороченные растения сафлора при более высоком расположении боковых ветвей и корзинки лучше подходят для механизированной уборки урожая. Хотя более высокая урожайность сафлора связана с числом корзинок на растение, числом семян на корзинку и массой 1000 семян, мы не смогли обнаружить никакой значимой связи между этими элементами структуры урожая и урожайностью семян. Однако для генетического улучшения урожайности логично сделать акцент на числе семян на корзинку вместо числа корзинок на растение или массы 1000 семян (13). Образцы 7, 28 и 33 были определены как лучшие по урожайности, образец 25 был выделен как лучший по массе 1000 семян, а образцы 72, 74 и 78 — как лучшие по числу корзинок на растение и числу семян на корзинку. Следовательно, их можно использовать в качестве селекционного материала в программах генетического улучшения сафлора. Было обнаружено, что высота растения и число семян на корзинку имели высокую дискриминантную способность, а также огромную репрезентативную способность как инструмент работы с идеальным признаком, что аналогично выводам H. Ebrahimi с соавт. (13). Таким образом, эти признаки могут быть использованы для исследования образцов, надежных по репрезентативному потенциалу всех признаков, которые могут различать образцы (26). Наиболее успешные образцы сафлора необходимо выбирать в соответствии с надлежащими индексами их эффективности, при этом АТ-biplot модель позволяет успешно осуществлять визуальный анализ необходимых данных. АТ-biplot модель имеет преимущества перед классическими методами благодаря визуализации анализа, позволяющей селекционеру понять структуру данных в целом, большому интерпретативному потенциалу, который обеспечивает возможность сравнивать образцы, и более легкому процессу группировки образцов и признаков.

Итак, полученные нами результаты могут быть полезны селекционерам сафлора для повышения урожайности. Признаком, который был выявлен и влиял на урожайность, оказался индекс урожая за два года, тогда как основные компоненты (урожайность семян, число корзинок на растение, число семян на корзинку и масса 1000 семян) не показали значительного влияния. Три образца (7, 28 и 33), которые были идентифицированы как лучшие по урожайности, можно рассматривать в качестве селекционного материала при создании сортов для полузасушливых регионов. Мы обнаружили, что высота растения и число семян на корзинку

имели высокую дискриминантную и репрезентативную способность.

Мы признательны д-ру W. Yan (Agriculture and Agri-Food Canada) за любезно предоставленное прилжение GGbiplot.

*Department of Plant Production and Genetics,
Agriculture College, University of Maragheh,
Amirkabir Highway, Maragheh, 83111-55181 Iran,
e-mail sabaghnia@maragheh.ac.ir ✉, j mohamad@alumni.ut.ac.ir,
mojtabanouraein@maragheh.ac.ir*

*Поступила в редакцию
18 августа 2024 года
Принята к публикации
16 октября 2024 года*

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2025, V. 60, № 1, pp. 33-47

VISUAL ANALYSIS OF ACCESSION BY TRAIT INTERACTION STRUCTURE OF AGRO-MORPHOLOGICAL TRAITS OF SAFFLOWER (*Carthamus tinctorius* L.) USING ACCESSION BY TRAIT (AT) BILOT MODEL

N. Sabaghnia✉, M. Janmohammadi, M. Nouraein

Department of Plant Production and Genetics, Agriculture College, University of Maragheh, Amirkabir Highway, Maragheh, 83111-55181 Iran, e-mail sabaghnia@maragheh.ac.ir (✉ corresponding author), j mohamad@alumni.ut.ac.ir, mojtabanouraein@maragheh.ac.ir

ORCID:

Sabaghnia N. orcid.org/0000-0001-9690-6525

Nouraein M. orcid.org/0000-0001-5124-7773

Janmohammadi M. orcid.org/0000-0002-6121-6791

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

We appreciate kind favors of Dr W. Yan (Agriculture and Agri-Food Canada) for GGEbiplot application

Final revision received August 18, 2024

doi: 10.15389/agrobiology.2025.1.33eng

Accepted October 16, 2024

Abstract

Safflower an ancient oilseed crop is known as one of the oldest crops grown under semi-arid regions. In this research, 100 safflower accessions were investigated in an alpha lattice scheme (10×10) with two replicates across two growing years. Some morphologic, agronomic, yield components and seed yield performance were measured. The accession by trait (AT) biplot model was fitted to understand the structure of AT interaction and explained 60 and 66% of observed variation for the first and second year, respectively. A nonagon was constructed in the first year, and accession 28 exhibited the superior performance height of the first capitulum, seed yield and harvest index, while an octagon was formed in the second year, and accession 28 indicated the best performance for plant height, height of the first capitulum, seed yield and harvest index. The arrow-view plots indicated positive associations between seed yield and harvest index in the both years. The perfect accession biplot indicated that accessions 30, 33, 39, 45 and 93 from Iran, accessions 72 and 83 from Canada, accession 58 from USA, and accession 28 from unknown origin were identified as the best perfect accessions. The perfect trait biplot showed that plant height and stem diameter were more desirable and had highest representative and discrimination potential for screening safflower accessions. Regarding the results of both years, it can be concluded that accessions 7 (from Iran), 28 (unknown origin) and 33 (from Iran) had good potential for seed yield across two years, so they are good candidates for further analysis in order to cultivar release process for semi-arid regions.

Keywords: arrow-view, polygon-view, perfect accession, perfect trait.

REFERENCES

1. Singh V., Nimbkar N. Safflower. In: *Breeding oilseed crops for sustainable production*. Academic Press, 2016, 149-167 (doi: 10.1016/B978-0-12-801309-0.00001-X).
2. Majidi M.M., Zadhoush S. Molecular and morphological variation in a world-wide collection of safflower. *Crop Science*, 2014, 54: 2109-2119 (doi: 10.2135/cropsci2013.12.0850).
3. Sabaghnia N., Yousefzadeh S., Janmohammadi M. Graphical evaluation of genetic diversity among some genotypes of *Lepidium sativum* L. using morphological traits. *Taxonomy and Biosystematics*, 2023, 15: 43-54 (doi: 10.22108/TBJ.2024.139710.1243).
4. Emongor V.E., Emongor R.A. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). In: *Neglected and Underutilized Crops*. Academic Press, 2023: 683-731 (doi: 10.1016/B978-0-323-90537-4.00024-7).
5. FAOSTAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2022. Available: <http://faostat.fao.org>. Accessed: 26.06.2024.

6. Biradar S.S., Patil M.K., Naik V.R., Mukta N., Nayidu N.K., Desai S.A. Safflower improvement: conventional breeding and biotechnological approach. In: *Accelerated plant breeding, Volume 4: Oil crops*. Springer, 2022: 279-312 (doi: 10.1007/978-3-030-81107-5).
7. Hassani S.M.R., Talebi R., Pourdad S.S., Naji A.M., Fayaz F. Morphological description, genetic diversity and population structure of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) mini core collection using SRAP and SSR markers. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2020, 34: 1043-1055 (doi: 10.1080/13102818.2020.1818620).
8. Neelima S., Prabhakar K., Ramanamma K.V. Genetic variability, heritability, association and divergence studies in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Journal of Oilseeds Research*, 2021, 38: 265-269 (doi: 10.56739/jor.v38i3.137150).
9. Bahmankar M., Nabati D.A., Dehdari M. Genetic relationships among Iranian and exotic safflower using microsatellite markers. *Crop Science and Biotechnology*, 2017, 20: 159-165 (doi: 10.1007/s12892-017-0001-0).
10. Minnie C.M., Pushpavalli S., Sujatha K., Sandeep S., Sudhakar C., Rajeshwar R.E.D.D.Y., Rani C.S. Genetic analysis for yield and its attributes in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Oilseeds Research*, 2020, 37: 253-259 (doi: 10.56739/jor.v37i4.136739).
11. Lira J.P.E., Barelli M.A.A., da Silva V.P., Felipin-Azevedo R., dos Santos D.T., Galbiati C., Poletine J.P. Safflower genetic diversity based on agronomic characteristics in Mato Grosso state, Brazil, for a crop improvement program. *Genetics and Molecular Research*, 2021, 20: 1-12 (doi: 10.4238/gmr18698).
12. Rahimi M. Genetic diversity, population structure and screening of molecular markers associated to agronomic traits in Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2021, 45: 1549-1560 (doi: 10.1007/s40995-021-01161-w).
13. Ebrahimi H., Sabaghnia N., Javanmard A., Abbasi A. Genotype by trait biplot analysis of trait relations in safflower. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 2023, 3: 67-73 (doi: 10.22126/ATIC.2023.8906.1086).
14. Yan W., Frégeau-Reid J. Genotype by yield* trait (GYT) biplot: a novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8242 (doi: 10.1038/s41598-018-26688-8).
15. Yan W. GGEbiplot — a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 1111-1118 (doi: 10.2134/agronj2001.9351111x).
16. Van Eeuwijk F.A., Bustos-Korts D.V., Malosetti M. What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype×environment interactions? *Crop Science*, 2016, 56: 2119-2140 (doi: 10.2135/cropsci2015.06.0375).
17. Anjani K. Components of seed yield in safflower (*Carthamus tinctorius*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 70(12): 873-875.
18. Janmohammadi M., Seifi A., Pasandi M., Sabaghnia N. The impact of organic manure and nano-inorganic fertilizers on the growth, yield and oil content of sunflowers under well-watered conditions. *Biologija*, 2016, 62: 227-241 (doi: 10.6001/biologija.v62i4.3410).
19. Fattahi M., Janmohammadi M., Abasi A., Sabaghnia N. The effects of farmyard manure and nitrogen fertilizer on the performance of safflower. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 2023, 3: 162-169 (doi: 10.22126/ATIC.2023.9604.1114).
20. Cerrotta A., Lindstrum L.I., Echenique V. Selection tools for oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Breeding Science*, 2020, 70: 558-566 (doi: 10.1270/jsbbs.20053).
21. Chapman M.A., Hvala J., Strever J., Burke J.M. Population genetic analysis of safflower (*Carthamus tinctorius*; *Asteraceae*) reveals a Near Eastern origin and five centers of diversity. *American Journal of Botany*, 2010, 97: 831-840 (doi: 10.3732/ajb.0900137).
22. Abou Chehade L., Angelini L.G., Tavarini S. Genotype and seasonal variation affect yield and oil quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean conditions. *Agronomy*, 2022, 12: 122 (doi: 10.3390/agronomy12010122).
23. Dwivedi S.L., Ceccarelli S., Blair M.W., Upadhyaya H.D., Are A.K., Ortiz R. Landrace germplasm for improving yield and abiotic stress adaptation. *Trends Plant Science*, 2016, 21: 31-42 (doi: 10.1016/j.tplants.2015.10.012).
24. Baljani R., Shekari F., Sabaghnia N. Biplot analysis of trait relations of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes in Iran. *Crop Research*, 2015, 50: 63-73.
25. Ali F., Yilmaz A., Chaudhary H.J., Nadeem M.A., Rabbani M.A., Arslan Y., Baloch F.S. Investigation of morphoagronomic performance and selection indices in the international safflower panel for breeding perspectives. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2020, 44: 103-120 (doi: 10.3906/tar-1902-49).
26. Karahan T., Akgün I. Selection of barley (*Hordeum vulgare*) genotypes by GYT (genotype×yield×trait) biplot technique and its comparison with GT (genotype×trait). *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18: 1347-1359 (doi: 10.15666/aecer/1801_13471359).