

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ АМАРАНТА

Магомедов И.М.

Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, Россия

В последние годы во многих странах мира стали интенсивно проводиться исследования с амарантом. Зерновой амарант дает семена, по характеристикам и свойствам сходные с зерном злаков. Семена амаранта содержат в среднем 15 - 18 % белка, 5 - 8% масла и 3,7 - 5,7 клетчатки, что выше, чем у большинства зерновых культур. (Для сравнения: содержание белка у кукурузы составляет 10 - 12,6%, жиров 4,6 - 6,7 %, у риса - 8% белка, 1,1% жиров, у пшеницы - 9 - 14%, белка, 1,1 - 3,4% жиров). Очень высоким считается и качество белка у амаранта, что связано со значительным содержанием в нем аминокислоты лизина. В белке амаранта его в два раза больше, чем у пшеницы, в три раза, чем у кукурузы и сорго, и даже в 1,5 раза больше, чем в сое и коровьем молоке. Если оценить идеальный белок (близкий к яичному) в 100 баллов, то молочный белок казеин будет иметь 72 балла, соевый - 68, пшеницы - 58, кукурузы - 44, а амаранта - 75 баллов. Семена амаранта являются также эффективным источником для производства масла и сквалена. Сквален это углеводород - производное изопрена, предшественник тритерпенов и стероидных соединений. Его содержание в масле амаранта составляет 8%. Он может использоваться для получения стероидных гормональных препаратов, для профилактики онко - и кардиозаболеваний, для косметических целей. Масло амаранта отличается высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот по сравнению с насыщенными. Зерно амаранта, в отличие от других зерновых, содержит очень мало глютенинов. Это важно для питания лиц, обладающих повышенной чувствительностью к зерновым, вследствие отсутствия у них ферментов, гидролизующих глютелины, и поэтому нуждающихся в аглютелиновой диете. С помощью амаранта можно повысить также плодородие почвы. При скашивании и последующем запахивании он оказывается прекрасным сидератом - зеленым органическим удобрением. Своеобразие амаранта определяется в значительной степени типом его фотосинтеза. Подобно кукурузе, сорго, просо, сахарному тростнику, амарант обладает C_4 путем фотосинтеза. Вместе с тем, в отличие от перечисленных растений, которые представляют собой малатные формы, амарант относится к аспаргатовым представителям C_4 растений, т. е. первичными продуктами фотосинтеза у него являются дикарбоновые аминокислоты, в том числе аспарагиновая кислота. Аспаргатовые представляют собой исходное соединение для образования лизина, высоким содержанием которого, как отмечалось выше, обладает амарант. Как C_4 растение, амарант характеризуется большой скоростью фиксации углекислоты в расчете на единицу поверхности листа, быстро растет и развивается, обладает мощной продуктивностью при условии высокой освещенности и температуры. C_4 путь локализован в клетках мезофилла, а C_3 путь - в клетках обкладочной проводящего пучка. Такое пространственное разделение процессов позволяет растениям с C_4 - путем фотосинтеза осуществлять фиксацию углекислоты даже при относительно закрытых устьицах, поскольку хлоропласты клеток обкладки используют в качестве доноров углекислоты образовавшиеся ранее малат или аспаргатовые. Фиксация CO_2 с участием фосфоенолпирувата (ФЕП) и образованием малата или аспаргата служит своеобразным насосом для поставки CO_2 в хлоропласты обкладки, функционирующие по C_3 - пути.

ФЕП-карбоксилаза обладает большим сродством к углекислоте, благодаря чему способна интенсивно использовать CO_2 даже при его низких концентрациях, как это бывает при полузакрытых устьицах. Интересно, что и сопротивление мезофилла диффузии CO_2 у C_4 - растений значительно меньше: оно составляет 0,3 - 0,8 см/сек в то время как у C_3 - форм - 2,8 см/сек. Важно также, что ФЕП-карбоксилаза отличается более высоким температурным оптимумом по сравнению с РБФ - карбоксилазой - основным ферментом C_3 - пути (30 - 45° по сравнению с 15 - 25°), что обеспечивает высокую интенсивность фотосинтеза C_4 растений при повышенных температурах. Амарант, в частности, способен фотосинтезировать даже при температуре выше 50°C. Минимальные температуры, при которых начинается фотосинтез у амаранта, составляют 12 - 15°C. Светонасыщение C_4 - фотосинтеза также происходит при более высоких значениях интенсивности света, чем у C_3 -растений. Так, у C_3 растений интенсивность фотосинтеза перестает увеличиваться при 4 - 5 тыс. Вт/м², в то время как у C_4 -форм этого не происходит даже на прямом солнечном свете, что соответствует 15 тыс. Вт/м² - в средней полосе России и свыше 25 тыс. Вт/м² - на юге. Именно такие особенности C_4 -растений, в том числе и амаранта, определяют высокую интенсивность их фотосинтеза и продуктивность при повышенных значениях температуры и освещенности. Показано, что C_3 - растения ассимилируют на полном солнечном свете CO_2 со скоростью 1 - 50 мг/дм².ч, а C_4 - растения - со скоростью 40 - 80 мг/дм².ч. Выяснение особенностей механизма фотосинтеза C_4 растений делает понятным и еще одно своеобразие физиологии амаранта - его высокую засухо-, термо- и солеустойчивость. Некоторые исследователи считают даже, что возникновению C_4 фотосинтеза способствовали ксероморфные т.е. засушливые условия окружающей среды. Выше отмечалось, что у C_4 -растений фотосинтез может осуществляться и при почти закрытых устьицах. Закрывание устьиц на наиболее жаркое время дня сокращает потери воды за счет транспирации. Однако эффективность использования воды, то есть отношение массы ассимилированного CO_2 к массе воды, израсходованной при транспирации у C_4 растений, может быть вдвое выше, чем у C_3 -растений. Понятно поэтому, что C_4 -растения имеют преимущество перед C_3 -растениями в засушливых местах обитания благодаря высокой интенсивности фотосинтеза даже при закрытых устьицах. Основная

причина пониженного расхода воды C_4 -растениями состоит в том, что их устьица оказывают высокое сопротивление диффузии газов, причем при подвядании листьев и сжатии устьиц оно многократно возрастает для паров воды и в меньшей степени для CO_2 . Низкая величина сопротивления диффузии клеток мезофилла для CO_2 при более высоком сопротивлении устьиц для H_2O благоприятствует повышению интенсивности фотосинтеза при сниженной транспирации у C_4 растений. Амарант регулирует транспирацию активными движениями замыкающих клеток устьиц, более или менее плотно замыкая их в полуденные часы. Опасность перегрева листьев ему практически не угрожает. Вследствие высокой термоустойчивости интенсивность фотосинтеза не снижается, а расход воды значительно сокращается, что сказывается на высокой эффективности использования им воды. Максимальная продуктивность амаранта обуславливает особую требовательность его к минеральному питанию. По потребности в питательных веществах амарант значительно превосходит даже кукурузу, тоже относящуюся к C_4 -растениям. Средний вынос минеральных веществ в расчете на 100 ц зеленой массы составляет: по азоту 25 - 30 кг, калию -75 - 85 кг, фосфору 18 - 22 кг, кальцию -35 - 40 кг, магнию 16 - 18 кг. Исходя из этих потребностей амаранта, определяют конкретные дозы удобрений. Урожай зерна достигает 60 ц/га при внесении в почву не менее 200 кг/га азота. Исследование взаимодействия между элементами минерального питания и функционированием C_4 -пути углерода показало, что эффективность использования азота C_4 -растениями выше, чем C_3 -формами. C_4 -растения характеризуются более высокой скоростью фотосинтеза и образования биомассы на единицу азота в листе. Большая эффективность использования азота у аспартатных форм C_4 -растений может определяться наличием тесной связи ассимиляции CO_2 с биосинтезом аминокислот. Быстрому перемещению соединений азота способствует взаимодействие клеток мезофилла и обкладки, которое обеспечивает ассимиляцию не только углерода, но и азота, а также функциональную сопряженность этих процессов. Известно, что на рибулезобисфосфаткарбоксилазу/оксигеназу (РБФК/О), особенно в C_3 -растениях, приходится больше половины растворимого белка клетки. В амаранте содержание РБФК/О значительно меньше, поэтому расходы азота на синтез основных ферментных белков также снижены, и основная доля его используется на новообразование клеточных структур. По всей вероятности, это и объясняет высокий уровень ФЭП у амаранта. На основании полученных результатов мы считаем, что «азот роста» у C_4 -растений значительно выше, а «азот поддержания» гомеостаза намного меньше, чем у C_3 -растений. При интенсивном использовании амарантом нитратной формы азота возникает опасность чрезмерной аккумуляции нитратов в его биомассе (особенно в стеблях). Поэтому важно применение оптимального сочетания различных источников азота в удобрениях, а также внесение других минеральных элементов, в частности калия и фосфора. Очень важно, что амарант активно поглощает также тяжелые металлы, радионуклиды, пестициды. Оказалось, что он настолько интенсивно накапливает и концентрирует эти вещества в тканях, что его можно использовать для ликвидации локальных загрязнений почв. Подобным же образом возможно применение амаранта в фитомелиоративных целях. Для ряда видов амаранта характерна выносимость к хлористому натрию. NaCl в концентрации до 10 мМ даже стимулирует рост и повышает продуктивность этих растений. Интенсивно поглощая NaCl из засоленных почв, амарант тем самым может эффективно улучшать их режим. Например, засоленные в результате поливного земледелия почвы удается рекультивировать с помощью 2 - 3-летнего возделывания амаранта в такой степени, что они оказываются пригодными для возделывания пшеницы. Наряду с хорошо изученной способностью амаранта приспосабливаться к недостатку влаги и засолению, в последние годы получены факты адаптации некоторых видов амаранта к прямо противоположно направленному воздействию - избытку влаги. Эти работы были предприняты в связи с необходимостью расширения областей культивирования амаранта, в частности, выявления видов, способных расти в условиях Северо-Запада России, для которых характерны периоды временного переувлажнения и затопления почвы, сопровождаемые кислородной недостаточностью.

Сравнительная оценка различных видов амаранта на устойчивость к затоплению показала, что из трех изученных видов - *A. cruentus* L., *A. edulus* L., *A. caudatus* L. наиболее устойчивым к данному воздействию оказался *A. cruentus* L. Он выдерживал почти без снижения продуктивности 2 недели затопления и даже через 3 недели подобного воздействия растения еще были далеки от гибели. Неустойчивый же вид амаранта (*A. edulus* L.) погибал уже через неделю пребывания в таких условиях. Интересно, что *A. cruentus* L. проявил себя способным адаптироваться не только к недостатку кислорода, но и к избытку ионов H^+ , то есть он лучше развивался на кислых почвах. Повышенная же кислотность является сопутствующим фактором при переувлажнении и затоплении почв. В заключение, необходимо подчеркнуть, что возделывание амаранта и использование его продукции в пищу, в виде кормов, лекарств в настоящее время представляется жизненно необходимым. Серьезное внимание следует обратить на экологическое значение этой культуры не только как источника диетических и экологически чистых продуктов, но и в связи с возможностью очистки и облагораживания с ее помощью почв. Обладающая высоким адаптационным потенциалом культура амаранта приобретает особое значение в условиях сегодняшнего дня, когда экологическая ситуация на Земле существенно осложнилась из-за антропогенной деятельности человека. Кроме того, амарант не столь требователен к условиям среды, как бобовые культуры. Более того, амарант - уникальное растение, имеющее полифункциональное применение. По энергетической эффективности производство белка амаранта является лидером среди всех известных растений. Он имеет самый низкий транспирационный коэффициент среди сельхозкультур, относительно солеустойчив, для его успешного развития не требуются применения гербицидов, обладает C_4 - фотосинтезом, способствующим высокой продуктивности растений. В 21 веке обеспечивать человечество белком целесообразно именно за счет растений, имеющих минимальные потребности в невозобновляемых источниках энергии. Вместе с тем, энергию для переработки растений с целью получения белка и производства растительного «мяса» можно получать благодаря фотосинтезу с применением экологических энергоустановок, где топливом может служить биомасса растений. Гены амаранта перспективны также для получения и трансгенных растений, что должно существенно повысить качество белка и у других, менее ценных в этом отношении культур.

Исходя из выше изложенного, можно считать, что амарант является наиболее конкурентоспособным растением, и в 21 веке, когда возможно истощение источников воды и минеральных элементов, он должен стать доминирующей культурой для обеспечения потребностей человечества. Предсказание Н.И. Вавилова, который писал, что «этот злак в будущем накормит все человечество», вероятно, будет реализовано в нашем столетии.