

RESEARCH PAPERS

Identification and Expression Characteristics of UDP-Glycosyltransferase Genes in Pear and their Correlation with Arbutin Accumulation

J. Li^a, S. Liu^a, T. Cui^a, B. Ding^c, Z. Zhou^{a,b,*}, L. Li^{a,**}

^a*Shanxi Agricultural University (College of Horticulture, Shanxi Agricultural University), Taigu, China*

^b*Southwest University (College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University), Chongqing, China*

^c*Shanxi Agricultural University (College of Forestry, Shanxi Agricultural University), Taigu, China*

*e-mail: zhouzhiqin@swu.edu.cn

**e-mail: tgliulin@163.com

Received March, 13 2022; Revised March 13, 2022; Accepted March 25, 2022

Abstract— As sugar donors, UDP-glycosyltransferases (UGTs) control many metabolic processes during plant growth and development and defend plants against biotic and abiotic stresses. In this study, a total of 178 *UGT* genes were identified in the pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.) genome based on conserved plant secondary product glycosyltransferase motifs, and 140 of these genes were found to be distributed randomly on 17 chromosomes. The *UGT* genes were classified into 16 groups according to a phylogenetic analysis. Furthermore, RNA-seq data were used to analyze *UGT* gene expression in pear fruits and leaves at different developmental stages, as well as *UGT* gene expression characteristics under biotic and abiotic stress. Moreover, the content of the characteristic metabolite-arbutin in these tissues was assessed using high performance liquid chromatography. The relationship between *UGT* transcription levels and the concentration of arbutin during fruit development was examined, indicating that 11 *UGT* genes were significantly related to the glycosylation of arbutin. This study provides an important functional analysis of pear *UGT* genes and offers a basis for further research on the genetic regulation arbutin synthesis.

Keywords: *Pyrus bretschneideri*, Pear, UGT, arbutin, expression, Pearson coefficient

RESEARCH PAPERS

Analysis and Identification of Hormone Changes and Related Regulatory Genes of *Ziziphus jujuba* Mill. at the Peak of Abortion

H. Y. Ren^a, D. K. Li^{a,*}, X. M. Du^a, Y. K. Wang^a, A. L. Zhao^a, X. F. Xue^a, and W. L. Su^a

^a*Institute of Pomology, Shanxi Agricultural University, Shanxi Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Use of Pomology, Taigu 030801, Shanxi, China*

**e-mail: ldkzao@126.com*

Received September 09, 2021; revised January 04, 2022; accepted January 04, 2022

Abstract—Embryo abortion is the main cause of failure of Chinese jujube cross breeding. In this study, we aimed to elucidate the molecular events occurring in abortive embryos of Chinese jujube. Based on the changes of endogenous hormone levels between Abortive and Developing embryo, the results of transcriptome sequencing revealed genetic information associated with fruit development. The transcriptional database of normal and abortive embryos was established by RNA-Seq and 1219 differentially expressed genes were screened out, and 16 differentially expressed genes were screened out from the pathway of Endogenous Hormone KEGG. There were 14 upregulated genes and 2 downregulated genes in abortive embryos compared with those in normal embryos. Quantitative real-time polymerase chain reaction analysis (qRT-PCR) was used to verify the differential expression of some genes. The transcriptome and digital gene expression profiling data of developing and abortive embryos provide exhaustive information that will improve our understanding of the molecular mechanisms underlying the formation of abortive embryos in Chinese jujube.

Keywords: *Ziziphus jujuba*, Chinese jujube, abortive embryos, endogenous hormone, transcriptome analysis, qRT-PCR

RESEARCH PAPERS

Verapamil Affected Pollen Germination and Tube Elongation Through Altering Calcium Dynamics, Actin Filaments and Cell Wall Components in Apple (*Malus domestica*)

C. Zhang^a, Q. Zhang^c, J. L. Li^{ub}, Q. An^b, T. Long^b, Y. Xing^{a,c}, Q. Q. Cao^{a,c}, L. Qin^{a,c}, *, and K. F. Fang^{a,b}, **

^a*Beijing Advanced Innovation Center for Tree Breeding by Molecular Design, Beijing University of Agriculture, 102206, China*

*b*College of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China
*c*Key Laboratory for Agricultural Application and New Technique, College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China

*e-mail: qinlingbac@126.com

**e-mail: fangkefeng@126.com

Received December 21, 2021; revised January 28, 2022; accepted February 14, 2022

Abstract—Calcium plays an essential role in plant developmental process, especially in pollen tube growth. Verapamil, an inhibitor of calcium channels, could affect extracellular calcium ion influx. The present study aimed to investigate the effect of verapamil on pollen tube growth of *Malus domestica* and the possible cytological mechanism. Results showed that verapamil affected pollen germination and tube growth in a dose dependent manner. 20 μM verapamil promoted pollen germination and tube growth, while 700 μM verapamil inhibited pollen germination and tube growth. Results from non-invasive ion-selective electrode technique and fluorescent labeling showed that 700 μM verapamil decreased calcium influx and disturbed $[\text{Ca}^{2+}]_c$ gradient at pollen tube apex. In addition, 700 μM verapamil also affected actin filaments. Further results demonstrated that 700 μM verapamil influenced distribution of pollen tube wall components such as callose, acid pectins and esterified pectins, Fourier-transform infrared analysis (FTIR) of chemical composition supported the above results. In summary, 700 μM verapamil triggered multiple cellular changes including Ca^{2+} influx, $[\text{Ca}^{2+}]_c$ gradient, actin filaments and pollen tube wall components. Based on the above results, we speculated that 700 μM verapamil inhibited apical growth of pollen tubes through altering Ca^{2+} influx, $[\text{Ca}^{2+}]_c$ gradient, actin filaments and cell wall components.

Keywords: Malus domestica, verapamil, pollen tube, calcium, actin, cell wall components

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No 5

RESEARCH PAPERS

Relationship Among Changes in Nonstructural Carbohydrate Content, Metabolic Enzyme Activity, and Growth Rhythm in *Lycoris radiata*

J. H. Cai^{a,*}, J. J. Fan^{b,}, Y. Zhang^a, X. Y. Wei^c, H. T. Chen^a, L. Feng^a, M. X. Ma^a, and J. Z. Ma^b**

^a*College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*

^b*College of Horticulture, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China*

^c*College of Art, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China*

**e-mail: cjhao7692@163.com;*

***e-mail: Joyce_nfu@163.com*

Received February 2, 2022; revised March 4, 2022; accepted March 7, 2022

Abstract – *Lycoris radiata* (L'Hér.) Herb. is a perennial bulbous flower with high ornamental value. However, the uncertainty of its flowering seriously restricts its commercial production. Carbohydrate storage plays an important role in the development of plants. Therefore, the nonstructural carbohydrate content and the activities of starch-metabolizing enzymes of *L. radiata* were measured as a means of investigating its physiological responses at various developmental stages. The results showed that the starch and soluble sugar content of the bulbs increased gradually during the vegetative stage but decreased rapidly during the reproductive stage. However, soluble proteins showed the opposite trend. The inflection points appeared after the flowering period, and the extreme value points emerged during the leaf senescence period. Starch content was positively correlated with granule-bound starch synthase (GBSS) and adenosine diphosphate glucose pyrophosphorylase (AGPase) activities ($R = 0.72-0.81$) but significantly negatively correlated with β -amylase activity ($R = -0.88$). AGPase, soluble starch synthase (SSS), GBSS, starch branching enzyme (SBE), and starch debranching enzyme (DBE) had important effects on leaf growth, while α -amylase and β -amylase were mainly related to dormancy and flowering. The lowest values of AGPase and sucrose phosphate synthase (SPS) activity and the peak value of β -amylase and α -amylase activity appeared during

the flowering period. The synchronized changes observed suggest that phenophase in *L. radiata* is coordinated with physiological metabolism. In particular, the timing of the valley and peak values of AGPase, SPS, β -amylase and α -amylase activity was highly synchronized with the flowering period, and this could be considered a reference for predicting flowering.

Keywords: *Lycoris radiata*, bulb physiology, growth rhythm, metabolic enzyme, nonstructural carbohydrate

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ГИСТОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ВТОРИЧНЫХ МЕТАБОЛИТОВ КУЛЬТУРЫ КЛЕТОК
Drosera rotundifolia L.**

© 2022 г. М. Т. Ханды^{а,*}, Г. К. Чернодед^а, В. П. Григорчук^а, Ю. В. Верещагина^а, А. В. Моршнева^а, Т. Ю. Горпенченко^а

^аФедеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: handy_89@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 01.04.2022 г.

Впервые получены длительно растущие каллусные культуры *D. rotundifolia*: морфогенная линия Green и частично дифференцированная ro/C-трансгенная линия Red. Гистологический анализ выявил наличие органогенеза и прямого соматического эмбриогенеза в линии Green и клеточной дифференциации в линии Red. На основе метода ВЭЖХ с УФ- и масс-селективным детектированием было идентифицировано 11 соединений: эллаговая кислота, гликопиранозид 3-О-метилэллаговой кислоты, 4-О-D-гликопиранозид 3,3'-ди-О-метилэллаговой кислоты, 3,3'-ди-О-метилэллаговая кислота, росолизид, синапоилглюкоза, галлат галлокатехина, 3-О-галактозид кверцетина, 3-О-глюкозид кверцетина, 3-О-галактозид мирицетина, 3-О-глюкозид мирицетина. Выявлены различия в накоплении нафтохинонов, эллаговой кислоты и ее производных, флаванов в зависимости от типа сформированных тканей и органов.

Ключевые слова: *Drosera rotundifolia*, галлокатехин галлат, россоллизид, синапоилглюкоза, морфогенный каллус, *rolC*, флавоноиды, флаваны, эллаговая кислота.

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

ОСОБЕННОСТИ ГЕНОМА, КОРРЕЛИРУЮЩИЕ С ОДНОЛЕТНОСТЬЮ РАСТЕНИЯ

© 2022 г. Н. Ф. Лунькова^а, В. Б. Иванов^{а, *}

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: ivanov_vb@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 08.03.2022г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

В работе на основании данных, собранных в последнем выпуске Базы Ботанического сада Кью (Англия), проанализировано, как зависит доля однолетников от суммы однолетних и многолетних видов от голоплоидного содержания ДНК (C-value), ploидности и числа хромосом на основании данных для 5038 видов трав. Ранее было показано, что C-value в среднем ниже у однолетников, чем многолетников, что рассматривалось как одно из проявлений нуклеотипического эффекта. Как эти зависимости проявляются с повышением ploидности и числа хромосом, в том числе и у диплоидов, не было изучено. У однодольных, в отличие от двудольных, нуклеотипический эффект ослабевает с увеличением ploидности. С увеличением числа хромосом доля однолетних диплоидных видов уменьшается, причем у однодольных гораздо более резко, чем у двудольных. При разных значениях ploидности максимум отношения числа однолетников к числу многолетников наблюдается при разных значениях C-value. Остается неясным, почему эти проявления различаются у однодольных и двудольных. Таким образом, проведенный анализ показывает, что однолетность коррелирует с особенностями генома и имеет значение не только величина C-value, но также ploидность и число хромосом.

Ключевые слова: голоплоидное содержание ДНК (C-value), минимальная длительность жизненного цикла, нуклеотипический эффект, полиплоидия

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.4:58.035

РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ТОМАТОВ ПОД СВЕТОМ РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА

© 2022 г. **О. В. Наконечная^{а, *}, А. С. Холин^б, Е. П. Субботин^б, О. В. Грищенко^а,
Е. В. Бурковская^а, Ю. А. Хроленко^а, М. Л. Бурдуковский^а, Ю. Н. Кульчин^б,
Ю. Н. Журавлев^а**

^а*Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*

^б*Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия*

*e-mail: markelova@biosoil.ru

Поступила в редакцию 30.12.2021 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принята к публикации 21.03.2022 г.

Исследовали развитие растений томата (*Solanum lycopersicum* L., сорт Бонсай) при освещении различными светодиодными лампами. В эксперименте использовали четыре варианта освещения: теплый белый (WW) в качестве контроля, солнечный бокс (SB), красно-зелено-синий (RGB) и красно-синий (FS). Они характеризовались различными комбинациями синей (B), зеленой (G) и красной (R) долей в спектре: 14% B : 48% G : 38% R (WW), 26% B : 41% G : 33% R (SB), 32% B : 19% G : 49% R (RGB), 27% B : 11% G : 62% R (FS). Плотность потока фотонов составляла 150 мкмоль квантов/(м² с). Установлено, что разница в соотношении R : G : B долей в спектрах не влияла на накопление сырой и сухой массы надземной части и корней, и на содержание воды и сухого вещества в зеленой части растений. Выявлены достоверные различия в строении устьичного аппарата в зависимости от соотношения основных длин волн (R : G : B) в спектре. Плотность распределения устьиц на нижней стороне листа была наибольшей у растений в условиях WW и наименьшей у растений в условиях FS, спектральный состав последнего

характеризовался уменьшением доли зеленого света в 4 раза и увеличением долей красного и синего света практически в два раза. Ожидается, размеры замыкающих клеток устьиц были наибольшими у растений в условиях FS и наименьшими у растений в условиях WW. Показатели для растений, выросших под RGB и SB располагались в промежуточном положении между этими минимальным (WW) и максимальным (FS) значениями. Ответ растений на увеличение или уменьшение долей основных длин волн (R : G : B) в спектре в диапазоне 20–30% был пластичным и не затрагивал изменение габитуса, но через физиологические параметры способствовал акклимации к некомфортным условиям. Заключено, что определенное влияние на накопление воды и сухого вещества в надземной части растений и строение устьичного аппарата может оказывать большая доля зеленого в спектре.

Ключевые слова: *Solanum lycopersicum*, искусственный свет, полихромные спектры, светодиоды, рост растений, устьичный аппарат

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1.582.26 : 574.5

РЕПРОДУКТИВНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ТОКСИКОГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ДИАТОМОВОЙ ВОДОРОСЛИ *Pseudo-nitzschia calliantha* Lundholm, Moestrup & Hasle ИЗ ТРЕХ ГЕОГРАФИЧЕСКИ УДАЛЕННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

□ 2022 г. С. Л. Полякова^{a, *}, Н. А. Давидовича^a, И. В. Стоник^b, Н. А. Мартыненко^c,
Ю. А. Подунай^a, Т. Ю. Орлова^b, М. С. Куликовский^c

^a Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского Российской академии наук”, Феодосия, Республика Крым, Россия

^b Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского

Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

^c Институт физиологии растений имени К. А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: svietlana.poliakova.77@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2021 г.

После доработки 23.01.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Используя методы репродуктивной биологии получено успешное меж- и внутри-популяционное половое воспроизведение штаммов *Pseudo-nitzschia*, выделенных из трех географически удаленных районов. Репродуктивная совместимость подтверждает принадлежность клоновых культур к токсикогенному виду-космополиту *P. calliantha*. Ввиду отсутствия внутриклонового воспроизведения можно говорить о гетероталлизме этого вида. На основании молекулярно-генетического анализа, выполненного с использованием хлоропластного гена *rbcL*, построено филогенетическое дерево, показывающее схожесть

штаммов *P. calliantha*, выделенных из Черного, Южно-Китайского и Адриатического морей. Отмечена относительная эвригалинность вида *P. calliantha*. С помощью иммуноферментного анализа установлена высокая концентрация домоевой кислоты (амнезиотоксина) в крымских и вьетнамских клоновых культурах *P. calliantha*.

Ключевые слова: *Pseudo-nitzschia calliantha*, штамм, половое воспроизведение, популяция, “цветение”, токсичность

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No. 5

RESEARCH PAPERS

Brassinosteroid Affects the Elongation of Mesocotyl and Coleoptile in *Zea mays* L. by Regulating the Network of Circadian Rhythm under Severe Stress

J. Shia, X.Q. Zhao^{a,*}, Y.N. Niu^{a,}, X.J. Chen^b, and X.W. Ren^c**

^aState Key Laboratory of Aridland Crop Science/College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070 P.R. China

^bResearch Institute of Nuclear and Biotechnologies, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, 830091 P.R. China

^cAgricultural Technology Center of Longxi County, Longxi, 748100 P.R. China

*e-mail: zhaoxq3324@163.com;

**e-mail: niuyn@gsau.edu.cn

Received January, 13 2022; Revised March 12, 2022; Accepted March 14, 2022

Abstract – The cooperative elongation both mesocotyl and coleoptile in maize (*Zea mays* L.) is associated with an ancient agriculture practice known as deep-seeding to improve its drought tolerance in germination. Circadian rhythm modulates diverse developmental processes throughout the maize life cycle, however, the relationships between circadian rhythm and mesocotyl/coleoptile elongation remains unclear. Herein, RNA-Sequencing (RNA-Seq) was constructed from mesocotyl and coleoptile in W64A and K12 at the seeding depth of 3 and 20 cm and 4.16×10⁻³ M 24-epibrassinolide (BL) treatment. Totally 916~13499 differentially expressed genes (DEGs) in eight comparisons were respectively identified. GO and KEGG enrichment analyses identified the relevant biological functions and metabolic pathways of these DEGs. In addition, a diverse range of candidate genes were mainly obtained from plant hormone signal transduction, brassinosteroid biosynthesis, zeatin biosynthesis, phenylpropanoid biosynthesis, TCA cycle, starch and sucrose metabolism, glycolysis/gluconeogenesis, MAPK signaling pathway-plant, and peroxisome. Particularly, we also systematically analyzed the complex molecular mechanism network among 53 circadian rhythm-related DEGs. Finally, quantitative real-time PCR (qRT-PCR) of 17 selected DEGs was conducted to validate the RNA-Seq and gene differentially expression results. These findings provide valuable information for further elucidates molecular basis against deep-seeding stress and genetic improvement of deep-seeding tolerance in maize.

Keywords: *Zea mays*, maize, mesocotyl/coleoptile, deep-seeding stress, 24-epibrassinolide, RNA-Seq, circadian rhythm 2

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No 5

RESEARCH PAPERS

Genome-Wide Identification, Gene Structure, and Expression Analyses of the *NtPP2C* Gene Family in *Nicotiana tabacum* in Response to Low Temperature, Salt, and Drought Conditions

Y. L. Gao^a, X. J. Chen^a, F. C. Jiao^a, X. F. Wu^a, Y. P. Li^{a,*}

Key Laboratory of Tobacco Biotechnological Breeding, National Tobacco Genetic Engineering Research Center, Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650021, China

**e-mail: 309349240@qq.com*

Received January 27, 2022; revised February 18, 2022; accepted February 25, 2022

Abstract – In plants, members of the large *PP2C* gene family regulate development, growth, and responses to stress exposure. While the tobacco genome is now readily available, there have been few analyses regarding the evolution, expression, and function of *PP2C* family genes in tobacco plants. Herein, a genome-wide identification strategy was used to explore *PP2C* gene structures, motifs, and expression patterns in different *Nicotiana tabacum* L. tissues, with their expression further being evaluated via real-time PCR under a range of stress conditions. In total, 183 *NtPP2C* genes were identified within the tobacco genome, and phylogenetic analyses revealed these genes to harbor similar gene structures and conserved motifs, and to be clustered within the same clade. The tissue-specific expression patterns of *NtPP2C* genes from Clade A were additionally characterized. Notably, *NtPP2C11* and *NtPP2C12* exhibited the highest levels of expression, while *NtPP2C18* and *NtPP2C19* transcripts were largely undetectable. Specific *NtPP2C* genes were found to be upregulated in response to low temperature, salt, and drought treatment conditions. Of these, *NtPP2C11* and *NtPP2C12* were significantly upregulated in response to these treatments, suggesting that they may play important roles in regulating plant responses to exogenous stressors. Overall, these data provide a robust foundation for further functional analyses of *NtPP2C* genes in tobacco.

Keywords: Nicotiana tabacum, genome-wide; NtPP2C gene family; tobacco; abiotic stress

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

РОСТ И СТРЕССОУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛОСОВИДНЫХ КОРНЕЙ ТАБАКА С КОНСТИТУТИВНОЙ ЭКСПРЕССИЕЙ ГЕНА *ARGOS-LIKE*¹

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi @ для авторизованных авторов.

^аИнститут биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимский федеральный
исследовательский центр Российской академии наук, Уфа, Россия

*e-mail: khalit.musin@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 24.02.2022 г.

Принята к публикации 03.03.2022 г.

Гены семейства *ARGOS* у растений играют важную роль в контроле размера органов, а также участвуют в регуляции роста растений при действии стрессовых факторов. Механизмы стрессоустойчивости растений с конститутивной экспрессией генов *ARGOS* остаются малоизученными. Волосовидные (бородатые) корни растений (hairy roots) могут быть использованы в качестве модельного объекта для исследования функций генов, поскольку эти корни сохраняют многие морфофизиологические особенности, характерные для нативных корней. Нами были получены волосовидные корни табака *Nicotiana tabacum* L. с конститутивной экспрессией гена *ARGOS-LIKE Arabidopsis thaliana* L. Генетически трансформированные корни набирали большую сырую и сухую массу по сравнению с контролем, как при нормальных условиях, так и при действии засоления, высоких температур и ацетата кадмия. В исследованных культурах трансгенных волосовидных корней, как при нормальных, так и при стрессовых условиях была повышена активность аскорбатпероксидаз, увеличен глутатионовый пул, а также содержание пролина. Таким образом, продукт гена *ARGOS-LIKE* оказывает свой позитивный эффект на продуктивность и стрессоустойчивость растений не только за счет стимуляции роста, но и за счет влияния на антиоксидантную систему.

Ключевые слова: *Agrobacterium rhizogenes*, *Nicotiana tabacum*, агробактериальная трансформация, антиоксидантная система, бородатые корни, стрессоустойчивость, глутатион

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ МЕЛАТОНИНА И ВОДНОГО ДЕФИЦИТА НА РОСТ, УРОВЕНЬ МДА И ДЫХАНИЕ МИТОХОНДРИЙ ГИПОКОТИЛЕЙ И КОРНЕЙ ЛЮПИНА

© 2022 г. И. П. Генерозова^{а, *}, С. В. Васильев^а, П. А. Буцанец^а, А. Г. Шугаев^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: igenerezova@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 22.03.2022 г.

Принята к публикации 27.03.2022 г.

Известно, что мелатонин способен повышать устойчивость растений к неблагоприятным абиотическим факторам (НФ), включая обезвоживание, однако механизмы подобного действия фитогормона остаются малоизученными. В работе было исследовано влияние мелатонина на рост, водный статус, уровень малонового диальдегида (МДА) и дыхание митохондрий, выделенных из различных органов этиолированных проростков люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.) в условиях обезвоживания. 4-суточные проростки лишали воды на одни сутки, что вызывало увеличение водного дефицита корней до 22%, а гипокотилей до 6%. Показано, что обезвоживание проростков вызывало торможение роста гипокотилей, тогда как прирост корней был на 13% больше, чем в контроле. Содержание МДА в тканях корней и гипокотилей возрастало. Обезвоживание проростков негативно сказывалось на дыхании митохондрий гипокотилей и корней, при этом снижалась скорость окисления субстратов, особенно малата, в состоянии 3, преимущественно за счет ингибирования активности цитохромного пути окисления (ЦП). Например, при окислении малата в митохондриях гипокотилей активность ЦП снижалась в 1.8 раза, а в митохондриях корней – в 4–5 раз. Обработка проростков мелатонином (0.1 мкМ) предотвращала увеличение содержания МДА в условиях обезвоживания у гипокотилей, но содержание МДА в корнях под влиянием мелатонина, наоборот, возрастало на 27%. В присутствии мелатонина рост гипокотилей в условиях обезвоживания приблизился к контрольному варианту, тогда как прирост корней под влиянием мелатонина был ниже контроля. Обработка проростков мелатонином не оказывала существенного влияния на дыхание митохондрий гипокотилей и корней контрольных растений. Однако в условиях водного дефицита мелатонин полностью предотвращал ингибирование окисления субстратов в состоянии 3 в митохондриях

гипокотилей, преимущественно за счет поддержания активности ЦП. В результате, обработка мелатонином вызвала увеличение скорости окисления малата в состоянии 3 в митохондриях гипокотилей на 87%, а сукцината на 26% по сравнению с митохондриями контрольных проростков. В митохондриях корней обработка растений гормоном лишь частично обращала ингибирующее действие обезвоживания на процесс окислительного фосфорилирования, при этом сохранялось торможение окисления дыхательных субстратов, особенно сукцината, а также торможение активности ЦП. Обсуждается возможная причина различного действия мелатонина и водного дефицита на уровень окислительного стресса и функционирование митохондрий в клетках гипокотилей и корней проростков люпина.

Ключевые слова: *Lupinus angustifolius*, гипокотили и корни этиолированных проростков люпина, водный дефицит, мелатонин, митохондрии, окисление субстратов, рост, содержание МДА

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

СУБКЛЕТОЧНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАРГАНЦА В ДВУХ ВИДАХ ЗЕЛЕННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ТОЛЕРАНТНОСТИ К ЕГО ПОВЫШЕННЫМ КОНЦЕНТРАЦИЯМ

© 2022 г. С. Г. Васильева^{a, b, *}, О. А. Горелова^a, О. И. Баулина^a, Е. С. Лобакова^a

^a*Биологический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

^b*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия*

^{*}*e-mail: vankat2009@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.02.2022 г.

После доработки 03.03.2022 г.

Принята к публикации 05.03.2022 г.

Впервые исследована толерантность клеток двух видов зеленых микроводорослей *Lobosphaera* sp. IPPAS-2047 и *Micractinium simplicissimum* IPPAS-2056 к повышенным

концентрациям марганца (в форме $MnCl_2$). Анализ фотосинтетической активности клеток, проведенный методом флуориметрии, и оценка динамики изменения оптической плотности суспензий клеток в области максимума поглощения хлорофилла показали различную толерантность микроводорослей к марганцу. Острая токсичность, определяемая в течение 4-х суток, проявлялась при концентрациях марганца от 1 г/л для клеток *M. simplicissimum* и от 10 г/л – для клеток *Lobosphaera* sp. Методом просвечивающей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией исследовано субклеточное распределение марганца в клетках микроводорослей в условиях повышенных, но нетоксичных концентрациях марганца в среде. Установлено отсутствие обособленных марганец-содержащих включений на поверхности и в клетках *Lobosphaera* sp. и дисперсное распределение марганца в клетках с концентрированием в области тилакоидов и пластоглобул. Марганец и фосфор впервые выявлены в пластоглобулах, что возможно связано с их поступлением и концентрированием в этих структурах, сопряженным с транслокацией компонентов тилакоидов в процессе их разборки при стрессе. Для клеток *M. simplicissimum* показана способность к экзоплазматическому окислению и образованию наночастиц марганца в межклеточном матриксе, на поверхности и в клеточных стенках, а также компартментация поступившего внутрь клеток марганца в вакуолях и связывания его с полифосфатными гранулами.

Ключевые слова: *Lobosphaera*, *Micractinium simplicissimum*, аналитическая электронная микроскопия, внутриклеточная локализация, микроводоросли, наночастицы марганца толерантность, тяжелые металлы.

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No. 5

RESEARCH PAPERS

Physiological Response of *Mentha aquatica* L., *Eryngium caucasicum* (Trautv.), and *Froriepia subpinnata* (Ledeb.) to Lead Stress

R. Hasanpour^a, F. Zaefarian^{a,*}, M. Rezvani^b, and B. Jalili^c

^a Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

^b Department of Agronomy and Plant Breeding, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

^c Department of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

*e-mail: fa_zaefarian@yahoo.com

Received December 28, 2021; revised February 27, 2022; accepted March 10, 2022

Abstract – *Mentha aquatica* L., *Eryngium caucasicum* Trautv., and *Froriepia subpinnata* Ledeb are native plants in Iran. Lead (Pb) is one of the most dangerous heavy metals that damages to plant growth process. In the present study, we investigated the biochemical response of *M. aquatica*, *E. caucasicum* and *F. subpinnata* to Pb stress in the three separate pot experiments. Experimental treatments were different concentrations of Pb including 0, 125, 250, 375, and 500 mg/kg of Pb in the soil. Chlorophyll *a* (Chl *a*), chlorophyll *b* (Chl *b*), carotenoid, phenol, flavonoid, DPPH, and Pb concentration in the shoot was measured. The result showed that Pb stress significantly affected photosynthesis pigments. The minimum Chl *a*, Chl *b*, and carotenoid content was produced at 500 mg/kg of Pb in the soil in all three plants. Total phenol and flavonoid compounds and antioxidant capacity of plants increased with enhancement of Pb concentration in soil. *M. aquatica* produced the maximum total phenol and total flavonoid compounds, and antioxidant activity compared to *E. caucasicum* and *F. subpinnata*. Enhancement of antioxidant compounds production due to the Pb stress could be a defense mechanism to tolerate Pb stress. The concentration of Pb in the shoot of all three plants was increased linearly with the enhancement in the concentration of Pb in soil. *M. aquatica* had the lowest concentration of Pb in the shoot. Also, *M. aquatica* was more resistant to Pb stress than the other two plants due to the lower effect of Pb stress on photosynthetic pigments and higher antioxidant compounds content.

Keywords: *Mentha aquatica*, *Eryngium caucasicum*, *Froriepia subpinnata*, carotenoid, chlorophyll, heavy metals, phenol, flavonoid

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

РОСТ КОРНЕЙ ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЙ ТАБАКА СО СВЕРХЭКСПРЕССИЕЙ ГЕНОВ ЭКСПАНСИНОВ И КСИЛОГЛЮКАНЭНДОТРАНСГЛИКОЗИЛАЗ В УСЛОВИЯХ КАДМИЕВОГО СТРЕССА²

© 2022 г. З. А. Бережнева^a, Х. Г. Мусин^a, Б. Р. Кулуев^{a,*}

^aИнститут биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

*e-mail: kuluev@bk.ru

Поступила в редакцию: 28.12.2021 г.

После доработки: 21.02.2022 г.

Принята к публикации: 25.02.2022 г.

Экспансины и ксилоглюканэндотрансгликозилазы играют важную роль в регуляции роста растений при оптимальных и стрессовых условиях. Нами ранее были созданы трансгенные растения табака, сверхэкспрессирующие гены экспансинов *NtEXPA1*, *NtEXPA5* и ксилоглюканэндотрансгликозилазы *NtEXGT* *Nicotiana tabacum* L. Целью данной работы стал морфофизиологический анализ корней этих трансгенных растений табака в условиях кадмиевого стресса. Трансгенные растения табака характеризовались увеличенной длиной корней по сравнению с растениями дикого типа, как при оптимальных условиях, так и при воздействии кадмия. Площадь клеток паренхимы корней трансгенных растений табака, сверхэкспрессирующих гены экспансинов *NtEXPA1* и *NtEXPA5* была больше по сравнению с диким типом, а в случае с трансгеном *NtEXGT* размеры клеток наоборот были меньше. Сверхэкспрессия генов *NtEXPA1*, *NtEXPA5* и *NtEXGT* способствовала увеличению общей антиоксидантной способности, активности аскорбатпероксидаз и уменьшению содержания пролина в корнях при действии кадмия. В побегах трансгенных по генам экспансинов растений обнаруживалось меньшее содержание МДА как при оптимальных условиях, так и при действии кадмия. Таким образом, показано, что трансгены *NtEXPA1* и *NtEXPA5* оказывают стимулирующее действие на рост корней табака в условиях кадмиевого стресса за счет усиления роста клеток растяжением и позитивного влияния на компоненты антиоксидантной системы. Ген *NtEXGT* также вовлечен в обеспечение роста корней при действии кадмия, в том числе через влияние на антиоксидантную систему.

² Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi @ для авторизованных пользователей.

Ключевые слова: *Nicotiana tabacum*, кадмий, ксилоглюканэндотрансгликозилазы, рост корней, сверхэкспрессия гена, трансгенные растения, экспансины.

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 574.24:581.198:57.042.2

**ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ МЕДИ В ИОННОЙ И
НАНОФОРМЕ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
DUNALIELLA SALINA (TEOD.)**

© 2022 г. Е. С. Соломонова^{а, *}, Н. Ю. Шоман^а, А. И. Акимов^а, О. А. Рылькова^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный
исследовательский центр Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского
Российской академии наук, Севастополь, Россия

*e-mail: solomonov83@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

Проведено комплексное исследование стрессовых откликов зеленой микроводоросли *Dunaliella salina* (Teod.) в ответ на добавление в культуральные среды f/4 и f/32 наночастиц оксида меди (0, 250, 665, 1330, 2000, 2500, 3750 мкг/л) и ионов меди (0, 15, 150, 200, 400, 580, 770 мкг/л). Установлено, что ингибирующее влияние меди на структурно-функциональные характеристики *D. salina* было менее выражено при выращивании водорослей на питательной среде f/4, что обусловлено высоким содержанием в среде хелатирующего агента ЭДТА, способного связывать растворенные в воде ионы металлов в хелатные комплексы, тем самым уменьшая их активность и токсическое действие на клетки и повышая биодоступность для водорослей. Показан различный механизм действия меди в ионной и наноформе на физиологию водорослей. Установлено, что медь в ионной форме оказывает цитотоксичное влияние на клетки *Dunaliella salina*, в то время как наночастицы CuO в большей мере механически воздействуют на поверхность клетки. При культивировании водорослей на среде f/32

замедление роста клеток, снижение флуоресценции диацетата флуоресцеина (FDA), удельного содержания хлорофилла на клетку, эффективности работы фотосинтетического аппарата и индукция синтеза АФК наблюдались при концентрации Cu^{2+} в среде выше 400 мкг/л. Тогда как негативное действие наночастиц CuO (НЧ) отмечено при содержании поллютанта выше 700 мкг/л и в большей степени сказывалось на морфологических изменениях клеток: происходило двукратное укрупнение клеток, количество шаровидных форм увеличивалось (до 71%), отмечались значительная деформация и перфорация плазмалеммы, преобладание деформированных клеток неправильной формы и агломерированных с наночастицами. Установлено, что максимальные исследуемые концентрации токсикантов не приводят к полной элиминации популяции, что, вероятно, обусловлено присутствием в культуре клеток, резистентных к воздействию меди (порядка 10–15% по данным FDA-окрашивания) и способных обеспечить выживаемость и последующее восстановление популяции *Dunaliella salina* при высоком уровне антропогенного загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: *Dunaliella salina*, относительная переменная флуоресценция хлорофилла, биоиндикация, внутриклеточные компоненты, проточная цитометрия, загрязнение металлическими наночастицами

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No 5

RESEARCH PAPERS

Tolerance and Physiological Responses in Two Populations of Harmel Plant to Silver Stress, a Suitable Candidate for Accumulation of Ag

K. Mahdavian^{a,*}

^a*Department of Biology, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran 19395-3697, Iran*

*e-mail: k.mahdavian@pnu.ac.ir

Received December 31, 2021; revised January 10, 2022; accepted January 10, 2022

Abstract – By studying harmel plants in Ag metal-contaminated mineral areas, it was found that harmel (*Peganum harmala* L.) plants can accumulate Ag metal, so the present study aimed to investigate the effects of Ag exposure (0, 1, 2.5, 5, 10 mg/L Ag) to harmel seedlings. Two populations (metallicolous and non-metallicolous) were compared about Ag tolerance, Ag accumulation, translocation factor (TF), photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activity and, non-enzyme metabolite. At first, harmel plants were studied for their ability to accumulate silver metal in a silver metal-contaminated mineral area. Also, the results of hydroponic culture

showed that the increase of Ag concentrations in the nutrient solution reduced root length, shoot length, root dry weight, shoot dry weight, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll, carotenoid and total soluble sugars in both populations, but the accumulation is more pronounced in metalicolous populations than non-metallicolous. In response to this, the antioxidant activities were increased under Ag exposure, and sharp in the metalicolous population. In conclusion, the above results show that harmel seems a suitable candidate for Ag-accumulation; and these findings support the use of harmel as an acceptable species for cultivation in soils that are contaminated with Ag and strategies to minimize the toxicity of Ag in plants.

Keywords: *Peganum harmala*, accumulation, ascorbate, glutathione, enzyme activity

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No. 5

RESEARCH PAPERS

24-Epibrassinolide Alleviates Aluminum Toxicity by Improving Leaf Chlorophyll Fluorescence and Photosynthetic Performance and Root Antioxidant-Oxidant Balance and Ascorbate-Glutathione Cycle in Maize

X. Q. Zhao^a*, J. Shi^a, Y. N. Niu^a, P. N. Lu^a, X. J. Chen^b, and T. T. Mao^a**

^a *State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070 P.R. China*

^b *Research Institute of Nuclear and Biotechnologies, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, 830091 P.R. China*

**e-mail: zhaoxq3324@163.com*

***e-mail: niuyn@gsau.edu.cn*

Received February 24, 2022; revised March 16, 2022; accepted March 24, 2022

Abstract—Aluminum (Al) is a major environmental stress that limits crop growth and production. 24-Epibrassinolide (EBR) can control stress responses, but how it regulates Al homeostasis in Al-stressed maize seedlings is poorly understood. Therefore, seedlings of two lines of maize (*Zea mays* L.) under Al stress (60 μ M AlCl₃) were treated with 1.0×10^{-6} M EBR. In roots exposed to Al, EBR helped protect membranes and reduced reactive oxygen species by activating antioxidant enzymes, the ascorbate-glutathione cycle, phytohormone signal, and proline accumulation. In leaves under Al stress, EBR increased photosynthetic performance by protecting chloroplast ultrastructure, increasing ribulose 1,5-biphosphate carboxylase activity, and improving gas exchange. With EBR, inhibiting photoinhibition and promoting photosystem II efficiency maximized chlorophyll fluorescence. Changes in expression levels of ten candidate

genes associated with antioxidant enzymes, phytohormone signals, mitogen-activated protein kinase (MAPK) pathway, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence were consistent with changes in physiological assays in maize seedlings in the different treatments. Therefore, EBR can help alleviate Al toxicity in maize by improving activity in multiple metabolic pathways.

Keywords: *Zea mays*, maize, aluminum stress, 24-epibrassinolide, chlorophyll fluorescence, photosynthetic performance, antioxidant system, ascorbate-glutathione cycle, phytohormone signal, RT-qPCR

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ НЕДОСТАТКА ЦИНКА В СУБСТРАТЕ НА РОСТ, ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ И СЕМЕННУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯЧМЕНЯ

© 2022 г. Н. М. Казнина^а *, Ю. В. Батова^а, Е. С. Холопцева^а, А. Ф. Титов^а

^а*Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук,*

Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”,

Петрозаводск, Россия

**e-mail: kaznina@krc.karelia.ru*

Поступила в редакцию: 16.01.2022 г.

После доработки: 25.01.2022 г.

Принята к публикации: 02.02.2022 г.

В условиях вегетационного опыта изучали влияние недостатка цинка в субстрате на ряд показателей роста, состояния фотосинтетического аппарата (ФСА), а также параметры семенной продуктивности ячменя (*Hordeum vulgare* L., сорт Нур) в зависимости от фазы развития растений. Выявлены различия в ответной реакции ячменя на дефицит цинка на разных фазах развития растений. В частности, в фазу колошения недостаток этого микроэлемента в субстрате вызывал торможение роста, однако не сказывался негативно на фотосинтетической функции растений. В фазу выхода в трубку отрицательное влияние недостатка цинка в отношении параметров роста сглаживалось, однако наблюдалось ингибирование работы ФСА. Ухудшение снабжения соцветия ассимилятами в этот период,

видимо, явилось одним из важных факторов снижения урожая семян, наблюдаемое у опытных растений. В фазу колошения растения, выросшие в условиях дефицита цинка, отставали от растений контрольного варианта по высоте побега и площади листовых пластинок подфлагового и флагового листьев, при этом скорость фотосинтеза у них не отличалась от контрольных значений или даже превышала их. Поддержание высокой скорости фотосинтеза в листьях, являющихся основными донорами ассимилятов для созревающих семян, обеспечило формирование полноценных зерновок на главном побеге, хотя и в меньшем количестве, чем в благоприятных условиях минерального питания.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare*, цинк, развитие, фотосинтез, формирование семян

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No 5

RESEARCH PAPERS

Genome-Wide Characterization and Expression Analysis of the *NF-X1* Family during Development and under Salt Stress in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.)

A. Kiyak^{a,*} and S. Uluisik^b

^a*Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Scientific, Technology Application and Research Center, 15030, Burdur, Turkey*

^b*Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur Food Agriculture and Livestock Vocational School, 15030, Burdur, Turkey*

**e-mail: alikiyak1@gmail.com*

Received December 8, 2022; revised February 26, 2022; accepted February 28, 2022

Abstract – The human NF-X1 transcription factor (TF) is found in eukaryotes and similar to human NF-X1 protein, plant proteins are also characterized by zinc finger motifs. NF-X1 TFs largely found in plants play a key role in growth, development, and stress tolerance. Although tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a model plant in molecular studies, little is known about *NF-X1* genes, particularly in response to abiotic stress conditions, plant development and fruit ripening. In this study, whole-genome analysis of the tomato *NF-X1* gene family was performed, and two *SINF-X1* (*SINF-X1-1* and *SINF-X1-2*) were identified. Gene structures, phylogenetic relationships with other species and *cis*-acting elements were revealed by using different bioinformatic analysis methods. According to publicly available RNA-seq data and RT-qPCR

analysis suggest that *SINF-X1* genes could be responsible in response to abiotic stress conditions. Furthermore, it was found that the expression of both genes was up-regulated as fruit ripened. Based on these results, our study may improve the current understanding of *SINF-X1* genes and will be helpful for future studies of the biological function in regulating fruit ripening or response to different abiotic stress conditions.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, *NF-X1* gene family, genome-wide, expression analysis, salt stress

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No 5

RESEARCH PAPERS

Interactive Effect of Organic (Urea-N) and Halo (NaCl) Priming on Photosystem II Efficiencies and Physiological Tolerance in Flax Plants under Saline Environment

Z. S. Siddiquia, N. Asima, Z. Uddin^b

*a*Stress Physiology and Phenomiccenters, Department of Botany, University of Karachi, Pakistan

*b*Department of Physics, University of Karachi, Pakistan

*e-mail: zamins@uok.edu.pk

Received February 12, 2022; revised March 8, 2022; accepted March 14, 2022

Abstract – An interactive effect of organic (urea) and halo (NaCl) priming on the photosystem II efficiencies and physiological tolerance of flax (*Linum usitatissimum* L.) plants was examined in a saline environment. Flax seeds were primed with different concentrations of organic nitrogen (ENGRO Urea F-46, 40% nitrogen), i.e., 60, 80, 100 ppm with or without 100 and 200 mM NaCl. Later seeds were allowed to germinate in a growth chamber at 30/20 ± 2°C day/night periods. Ten-day-old seedlings were transplanted in rectangular pots. Two-week-old plants were subjected to salt stress with uniform NaCl concentration (250 mM). Combined priming caused a substantial increase in the light-harvesting ability of flax plant i.e. light absorption per reaction centers (ABS/RC), maximal quantum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and performance index (PI_{abs}) in salt stress environment. A 20-65% increase was observed in the electron transport rate from quinone A (QA) to plastoquinone (PQ). Osmotic potential, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), and H₂O₂ were reduced, but Na⁺ and Ca²⁺ ions accumulation were increased. A regression model was developed and discussed for the physiological assessment and trend evaluation.

Keywords: *Linum usitatissimum*; nitrogen fertilizer; salinity tolerance; water retention; fluorescence.

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No. 5

RESEARCH PAPERS

Salicylic Acid and Iron Reduce Salt-Induced Oxidative Stress and Photosynthesis Inhibition in Strawberry Plants

K. Lamnai^{a,*}, F. Anaya^{a,b}, R. Fghire^c, I. Janah^a, S. Wahbi^a, and K. Loutfi^a

^a *Laboratory of Agro-Food, Biotechnologies and Valorization of Plant Bioresources (AGROBIOVAL), Department of Biology, Faculty of Sciences Semlalia, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco*

^b *FSLab-Food Science Laboratory, Faculty of Sciences and Technology, University of Algarve, 8005-139 Faro, Portugal*

^c *Department of Biology, Faculty of Sciences, University Chouaib Doukkali, EL Jadida, Morocco*
**e-mail: lamnaikamal@gmail.com*

Received August 04, 2021; revised February 19, 2022; accepted March 02, 2022

Abstract – Oxidative stress is usually induced under saline conditions, adversely affecting yield and crucial physiological processes in plants. The present work was conducted to investigate the beneficial effects of salicylic acid (0.25 mM) and chelated iron (2 ppm) on strawberry tolerance to oxidative stress triggered by NaCl toxicity. Salt stress (80 mM NaCl) remarkably reduced stomatal conductance and photosynthetic pigment levels in stressed plants compared to unstressed ones. The application of SA and chelated iron was more efficient for gas exchange and pigment production. The SA and/or iron also attenuated the salinity-induced inhibitions on maximum fluorescence (F_m), maximum photochemical efficiency of photosystem II (ϕ_{P0}), quantum yield for electron transfer (ϕ_{E0}), quantum yield for the reduction of the end electron acceptors at the PSI acceptor side (ϕ_{R0}), performance index (PI_{ABS}) and reaction centers density (RC/CS), while it reduced the minimum fluorescence (F_0) and the quantum yield of energy dissipation (ϕ_{D0}). Additionally, significant increases in hydrogen peroxide levels (H_2O_2), lipid peroxidation (MDA) and cellular solutes leakage (EL) were revealed under saline conditions. However, this damage was alleviated by the application of SA and iron supplementation. Furthermore, SA and/or iron treatments stimulated the enzyme defence system with increased (POD, SOD and CAT) or reduced (PPO) activity in treated plants. Noted that the interaction between SA and chelated iron was most beneficial to the treated plants relative to their separate treatment. This study suggests that an interaction between SA and iron could be a practical strategy to protect the strawberry crop under saline conditions.

Keywords: *Fragaria ananassa*, salicylic acid, fluorescence, iron, membrane stability, antioxidant enzymes

Russian Journal of Plant Physiology, 2022, Vol. 69, No. 5

RESEARCH PAPERS

Photosynthesis, Membrane Stability and Proline Metabolism Enzyme Activity as Potential Indicators for Salt Tolerance in Wheat

D. L. Bagdi^a, S. Gupta^a, D. K. Bagdi^b, Rajesh Kumar Singhal^c, and N. K. Gupta^{a, *}

^a*Sri Karan Narendra Agriculture University, Jobner, Jaipur, India*

^b*Rajasthan College of Agriculture, MPUAT, Udaipur, India*

Received November 11, 2021; revised February 09, 2022; accepted February 14, 2022

Abstract—An experiment was conducted to study the impact of differential physiological and biochemical indicators on salinity tolerance in wheat. Wheat cultivars Raj-3777 (salinity tolerant) and HD-2687 (salinity susceptible but widely cultivable) were grown in ceramic pots and filled with 15 kg soil mixed with recommended doses of manures and fertilizers. Seeds were sown in normal water and saline water was applied after the plant establishment. Saline water of electrical conductivity (EC) 0 (tap water), 4, 8 and 12 dSm⁻¹ were prepared by mixing chloride and sodium salts in 3 : 1 ratio using NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂ and MgCl₂ and applied to plants as and when required to maintain the desired level of salinity. The result showed that the tolerant cultivar Raj-3777 exhibited a different pattern of responses compared to HD-2687 for most of the recorded parameters. Inhibition in photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance were lesser in Raj-3777 compared to HD-2687. The chlorophyll content, relative water content, cell membrane stability and protein content were higher in the leaves of tolerant cultivar under saline conditions. It exhibited higher sodium accumulation in root via managing restricted translocation of sodium on the cost of potassium. Thus, the potassium content was recorded higher in leaves than roots. The inhibition of pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS), pyrroline-5-carboxylate reductase (P5CR), ornithine- δ -aminotransferase (OAT) and proline dehydrogenase (ProDH) activities were recorded higher in the tolerant cultivar. The study envisaged that the lesser reduction in net photosynthetic rate, lower electrolyte leakage, maintenance of higher leaf water status, retention of chlorophyll and high potassium content in leaves on the cost of low sodium transportation from roots might be the potential indicators for selection of salt-tolerant wheat cultivars, which can be used for its improvement through transgenic approaches. The observed negative relationship between the amount of proline accumulation and the level of salt tolerance did not support the widely advocated role of proline as an osmoprotectant under salt stress.

Keywords: *Triticum aestivum*, cations, gas exchange, photosynthesis, proline metabolism, salinity, wheat

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, 2022, том 69, № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ ПШЕНИЦЫ К МОРОЗУ
ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

© 2022 г. Ю. В. Венжик^{а*}, **В. В. Таланова^б**, А. А. Игнатенко^б,

Н. С. Репкина^б, Е. С. Холопцева^б, А. Ф. Титов^б

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

^бИнститут биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”, Петрозаводск, Россия

*e-mail: jul.venzhik@gmail.com

Поступила в редакцию 29.11.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Представлены данные об особенностях адаптации озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L., сорт Московская 39) к морозу в результате действия низких закаливающих температур разной интенсивности. Проведен сравнительный анализ динамики показателей, характеризующих морозоустойчивость, рост, скорость транспирации, интенсивность окислительных процессов, состояние фотосинтетического аппарата, структуру клеток листьев и уровень транскриптов гена *WCOR15* (кодирующего белок холодового ответа) в процессе закаливания растений пшеницы при температуре 12, 8 и 4°C. Показано, что при холодовой адаптации происходит “перепрограммирование” растительного организма, степень и глубина которого определяются интенсивностью низкотемпературного воздействия: чем ближе закаливающая температура к повреждающим значениям, тем более быстрые и значительные адаптивные изменения она вызывает, и тем бóльшую морозоустойчивость способны развивать растения в процессе закаливания.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, адаптация, низкотемпературное закаливание, рост, транспирация, окислительный стресс, фотосинтетический аппарат, ген *WCOR15*