

Zmeny v architektúre koreňovej sústavy rastlín rajčiaka jedlého po aplikácii arbuskulárnych mykoríznych húb v podmienkach stresu zo sucha

Katarína Hrčková¹
Marcela Gubišová²
Jozef Gubiš³
Miroslav Horník⁴
Martina Hudcovicová⁵

¹ Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum - Výskumný ústav rastlinnej výroby, Bratislavská cesta 122, 921 68 Piešťany, katarina.hrckova@nppc.sk

² Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum - Výskumný ústav rastlinnej výroby, Bratislavská cesta 122, 921 68 Piešťany, marcela.gubisova@nppc.sk

³ Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum - Výskumný ústav rastlinnej výroby, Bratislavská cesta 122, 921 68 Piešťany, jozef.gubis@nppc.sk

⁴ Katedra ekochémie a rádioekológie, Fakulta prírodných vied, Univerzita sv. Cyrila a Metoda v Tmave, Nám. J. Herdu 2, 917 01 Tmava, miroslav.hornik@ucm.sk

⁵ Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum - Výskumný ústav rastlinnej výroby, Bratislavská cesta 122, 921 68 Piešťany, martina.hudcovicova@nppc.sk

Grant: APVV-17-0150

Název grantu: Interakcie arbuskulárnych mykoríznych húb s rastlinami v stresových podmienkach a ich potenciál pri fytoimediačných metódach

Oborové zamčrení: GD – Hnojní, závlaha, zprarování pŕdy

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt V príspevku sú hodnotené rastové parametre a koreňová sústava rajčiaka jedlého (*Solanum lycopersicum* L.) po inokulácii trojicou arbuskulárnych mykoríznych húb (AMF) *Rhizoglossum irregulare*, *Funneliformis mosseae* a *Funneliformis caledonium*. Mladé rastliny inokulovanej aj kontrolnej skupiny boli vystavené podmienkam nedostatku vody. Dominantným faktorom bol stres zo sucha, ktorý významne redukoval prírastok nadzemnej biomasy, výšku rastlín, hrúbku stonky aj počet listov. Na úrovni koreňového systému došlo k výraznému skráteniu celkovej dĺžky, makroskopického povrchu aj objemu koreňov. Aplikácia AMF vykazovala pozitívny trend v sledovaných znakoch v oboch typoch pestovateľských podmienok, hoci rozdiely neboli štatisticky významné. Zásadný prínos inokulácie bol zaznamenaný v podmienkach stresu, kedy takto ošetrované rastliny dokázali zachovať základné parametre koreňovej sústavy na úrovni neinokulovaných rastlín v optimálnych podmienkach. Aplikácia AMF podporila vetvenie koreňovej sústavy a spôsobila významné zmeny v podieloch koreňov prvého a druhého rádu na celkovom počte sekundárnych koreňov.

Kľúčové slová abiotický stres, arbuskulárna mykoríza, koreňová architektúra, rajčiak jedlý

1. ÚVOD

Abiotické stresy vrátane stresu zo sucha patria medzi faktory významne vplývajúce na rast a produktivitu poľnohospodárskych plodín. Stres zo sucha vplýva na produktivitu rastlín priamo, prostredníctvom znižovania rýchlosti fotosyntézy kvôli zníženému príjmu CO₂ v dôsledku uzatvárania prieduchov a obmedzenému príjmu živín z pôdneho roztoku (OSAKABE a kol., 2014), ale aj nepriamo, kedy na biochemickej úrovni dochádza k zmenám, ktoré rastlinné bunky poškodzujú, najmä produkcia reaktívnych foriem

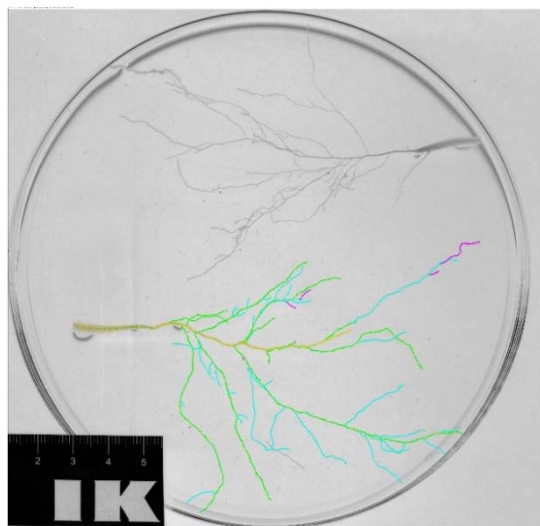
kyslíka. Na druhej strane sa pri strese iniciuje syntéza antioxidantných enzýmov, kyseliny abscisovej, prolínu a regulačných proteínov, ktorých úlohou je rastlinu chrániť a zvyšovať toleranciu na stres (SUN a kol., 2020; CHANDRASEKARAN a kol., 2021). Významnú úlohu v tomto procese môžu zohrávať aj arbuskulárne mykorízne huby (AMF) žijúce v symbióze s koreňmi rastlín. AMF, trieda *Glomeromycetes*, vytvárajú rozvetvenú sieť hýf s typickými štruktúrami nazývanými arbuskuly, ktorými zvyšujú schopnosť koreňov absorbovať vodu a translokovať do častí rastlinného tela v nej rozpustené živiny (DIAGNE a kol., 2020; VOLPE a kol., 2018) a zároveň zlepšujú toleranciu rastlín na stres prostredníctvom vlastných antioxidantných obranných systémov (ZOU a kol., 2021). Ukázalo sa, že pôsobenie abiotického stresu zvyšuje v AMF produkciu glomalínu, hydrofóbného glykoproteínu typického pre *Glomeromycetes*, ktorý sa z odumretých hýf odbúrava a uvoľňuje do pôdy, kde stabilizuje pôdne agregáty a znižuje vysušenie pôdy zvyšovaním jej vodnej kapacity (SHASHTRI a kol., 2020; SINGH a kol., 2013). Klimatická zmena so zvyšujúcou sa úrovňou sucha v ostatných rokoch pestovateľov neustále nabáda do hľadania možností, ako efektívne využívať biofertilizáciu, vrátane aplikácie AMF, na elimináciu alebo zníženie dopadov abiotických stresov na produkciu rastlín (KIM a kol., 2017; BEGUM a kol., 2019).

Kolonizácia koreňov AMF ovplyvňuje ich rast a remodeláciu celého koreňového systému rastlín najmä podporou tvorby laterálnych koreňov (GUATJAHN a PASZKOWSKI, 2013). Vplyv AMF na koreňovú sústavu ako aj rastlinu ako celok je však ovplyvnený mnohými faktormi, ako druh AMF a intenzita kolonizácie koreňov, rastlinný druh a genotyp a v neposlednom rade podmienky kultivácie vrátane vlastností pôdy (HUANG a kol., 2020; RONGA a kol., 2019; KIM a kol., 2017). Preto je úspech aplikácie AMF pri pestovaní rastlín vždy otázkou správneho výberu druhu alebo kombinácie druhov AMF pre daný rastlinný druh a genotyp pri zohľadnení pestovateľských podmienok (RONGA a kol., 2019).

Cieľom nášho experimentu bolo overiť vplyv aplikácie AMF na rastové parametre a koreňovú sústavu mladých rastlín rajčiaka jedlého (*Solanum lycopersicum* L.), ktorý patrí medzi najrozšírenejšie pestované druhy zeleniny na svete.

2. METODIKA

V experimente boli použité rastliny rajčiaka jedlého (*Solanum lycopersicum* L.), odr. Karla. Inokulácia AMF prebehla v čase výsevu semien do pôdy, kontrolné rastliny boli bez inokulácie. Na inokuláciu bol použitý komerčne dostupný prípravok INOQ Advantage (INOQ GmbH, Nemecko) obsahujúci zmes 3 druhov AMF: *Rhizoglossum irregulare*, *Funneliformis mosseae* a *Funneliformis caledonium* s koncentráciou 550×10^4 mykorizných jednotiek/ml. Pôda používaná v experimentoch bola sterilizovaná autoklávaním (121 °C, 20 min.) a miešaná v pomere 1:1 so sterilizovaným pieskom. Koncentrované inokulum bolo riedené s homogenizovanou sterilnou pôdou v pomere 1:50 a aplikované do výsadbovej jamky v dávke 0,5 ml inokula na semeno. Po 1 mesiaci kultivácie bol pri polovici rastlín navodený stres zo sucha. V experimente boli rastliny rozdelené na nasledovné varianty: KO-opt – kontrolné neinokulované rastliny s optimálnou zálievkou, KO-stres – neinokulované rastliny s polovičnou zálievkou, AMF-opt – rastliny inokulované AMF s optimálnou zálievkou, AMF-stres – inokulované rastliny s polovičnou zálievkou.



Obr. 1: Obrazová analýza koreňovej sústavy rajčiaka jedlého v programe ImageJ a SmartRoot; hore – primárny obraz koreňovej sústavy, dole – farebne odlišené rády koreňov.

Odber rastlinného materiálu na hodnotenia sa realizoval po ďalších 15 dňoch vo fáze BBCH 13-14. Z pokusných nádob boli extrahované celé rastliny s kompletným koreňovým systémom. Z rastlín bola skalpelom oddelená nadzemná časť, ktorá sa ďalej spracovávala samostatne, pričom boli hodnotené rastové parametre rastlín (výška rastlín, hrúbka stonky na báze, počet listov, čerstvá hmotnosť nadzemnej biomasy, suchá hmotnosť nadzemnej biomasy a koreňov). Korene boli nad sitami jemne očistené od pôdy a nečistôt vo vode tak, aby sa predišlo ich poškodeniu a stratám. Nasledne boli nasnímané s kontrastným tmavým matným pozadím v rozlíšení 1200 DPI. Metódou obrazovej analýzy v programe ImageJ a SmartRoot boli získané základné makroskopické morfológické údaje koreňovej sústavy. Pre korektný postup analýzy je najprv primárny obraz invertovaný do odtieňov šedej. Pre označené korene (obr. 1) algoritmus vypočíta základné parametre a umožňuje vytvoriť ich vzájomnú hierarchiu, pričom farebne rozlišuje jednotlivé rády.

Systém je semi-automatizovaný a dovoľuje kontrolu a zmenu užívateľovi.

Výsledky meraní boli spracované pomocou štatistického programu Statgraphics Centurion XVI pri hladine významnosti $\alpha = 0,05$.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Rastové parametre nadzemnej biomasy

Z hodnotenia vplyvu stresu zo sucha a inokulácie rastlín rajčiaka jedlého kombináciou troch druhov AMF (*R. irregulare*, *F. mosseae* a *F. caledonium*) vyplynulo, že stres zo sucha ovplyvnil štatisticky významne takmer všetky hodnotené rastové parametre nadzemnej biomasy (tabuľka 1). Po aplikácii dvojtypného stresu na rastliny boli pri rastlinách inokulovaných AMF namerané vyššie hodnoty rastových parametrov: výška rastlín (o 7,6 %), hrúbka stoniek (8 %), počet listov (18,5 %) čerstvá (19,2 %) a suchá hmotnosť nadzemnej časti rastlín (17,7 %), štatisticky významný vplyv inokulácie sa však potvrdil len pri parametri počet listov (tabuľka 1). Naopak pri parametri stresu boli rozdiely takmer pri všetkých hodnotených parametroch štatisticky významné. Takisto RONGA a kol. (2019) vo svojich experimentoch s rajčiakom jedlým zistili významný vplyv stresu na rastové parametre rajčiaka, pričom vplyv inokulácie AMF bol významný pri veľkosti listovej plochy. Merané parametre v ich experimente varíovali v závislosti od druhu aplikovaných AMF, *Funneliformis mosseae* alebo *Rhizoglossum intraradices* (syn. *R. irregulare*) a genotypu rajčiaka. Kým RONGA a kol. potvrdili vyššiu efektivitu zvládania stresu zo sucha pri aplikácii *F. mosseae*, iná skupina, VOLPE a kol. (2018), na základe meraných fyziologických parametrov rastlín rajčiaka pozorovali naopak vyššiu efektivitu zvládania stresu pri *R. intraradices*. To len potvrdzuje fakt, že formulácia aplikovaných AMF musí byť vždy vedecky overená. Napr. LEVENTIS a kol. (2021) inokulovali rastliny rajčiaka jednotlivito opäť rovnakými druhmi AMF, pričom v ich experimente pozorovali, že kolonizácia koreňov AMF významne zvýšila vegetatívny rast rastlín o 40 % a 50 – 60 % pri štandardnej aj redukovanej závlaha. Tiež ABDULKAREEM (2018) pozoroval pozitívny vplyv týchto druhov AMF na rastové parametre rajčiaka, ak boli aplikované samostatne, ale pri inokulácii zmesou húb neboli pozitívne vplyvy AMF na produkciu biomasy štatisticky významné. V našich experimentoch bola aplikovaná zmes 3 druhov AMF (dva druhy boli totožné s vyššie uvedenými prácami), pričom produkcia biomasy bola v podmienkach stresu pri inokulovaných rastlinách vyššia, avšak rozdiel nebol štatisticky významný.

V našom experimente boli tiež zistené rozdiely v pomere hmotností nadzemnej a podzemnej biomasy vo vzťahu k inokulácii rastlín, kedy pri rastlinách s AMF dosiahol pomer koreň/nadzemná biomasa hodnotu 2,16, resp. 2,26 (pri optimálnych, resp. stresovaných podmienkach) a pri rastlinách kontrolných 2,41, resp. 2,52, čo naznačuje, že rastliny inokulované AMF mohli venovať väčšiu časť energie tvorbe nadzemnej biomasy ako rastliny bez inokulácie. Tento fakt je pripisovaný práve schopnosti AMF zlepšiť príjem živín z pôdy, čím investícia rastliny do tvorby koreňov môže klesať (VERESOGLOU a kol., 2012).

Tabuľka 1: Rastové parametre nadzemnej biomasy rajčiaka jedlého – vplyv inokulácie AMF a stresu zo sucha; štatisticky spracované LSD testom pri $\alpha = 0,05$.

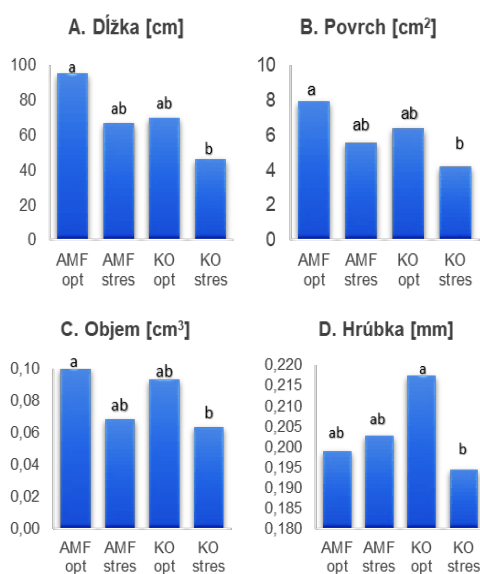
	Výška rastlín [mm]	Hrúbka stonky [mm]	Počet listov
AMF opt	107,67±15,03 ^a	1,94±0,32 ^a	3,67±0,50 ^a
AMF stres	86,00±5,94 ^b	1,63±0,21 ^b	3,56±0,53 ^a
K opt	101,22±14,51 ^a	2,08±0,24 ^a	3,67±0,50 ^a
K stres	79,89±13,72 ^b	1,51±0,33 ^b	3,00±0,50 ^b

	Čerstvá hmotnosť [g]	Hmotnosť sušiny [mg]
AMF opt	0,77±0,18 ^a	4,63±1,07 ^a
AMF stres	0,49±0,06 ^b	3,99±0,52 ^{ab}
K opt	0,74±0,18 ^a	4,60±1,11 ^a
K stres	0,41±0,17 ^b	3,39±1,39 ^b

3.2 Rastové parametre koreňovej sústavy

Obrazovou analýzou koreňov rajčiaka sa zistilo, že inokulácia AMF zlepšila rastové parametre koreňov: dĺžka koreňov (o 14,6 %), hrúbka koreňov (4,6 %), objem koreňov (6,3 %) a povrch koreňov (13,2 %), hoci rozdiely neboli štatisticky významné (Obr. 2). Celková dĺžka koreňovej sústavy (Obr. 2A) je jeden z hlavných ukazovateľov, ktorými rastliny reagujú na zmeny vonkajšieho prostredia. Pôsobenie stresových podmienok v skoré fáze vývoja výrazne skracovalo celkovú priemernú dĺžku koreňov v porovnaní s optimálnymi podmienkami. Aplikácia inokulantu taktiež vykazovala zásadný význam a ošetrované rastliny reagovali štatisticky významným prírastkom celkovej dĺžky koreňovej sústavy. Inokulácia v stresových podmienkach podporovala testované rastliny natoľko, že priemerná celková dĺžka ich koreňovej sústavy bola zo štatistického hľadiska na rovnakej úrovni kontrolnej skupiny bez inokulácie pestovanej v optimálnych podmienkach.

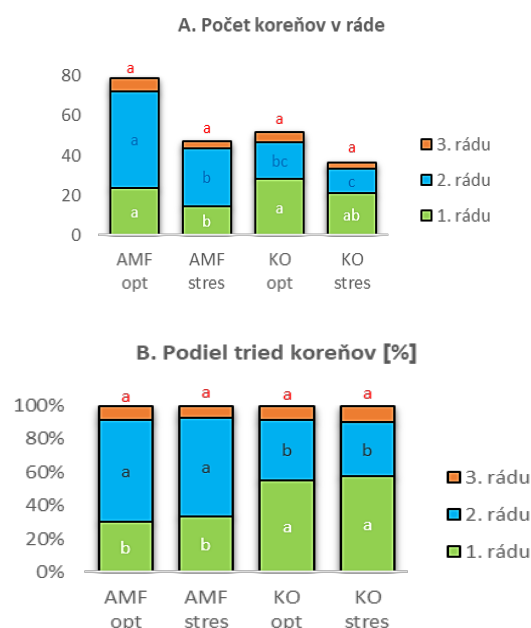
Makroskopický povrch a objem koreňov (Obr. 2B, 2C) vykazovali vysokú koreláciu s celkovou dĺžkou koreňov (Pearsonov koeficient: 0,9848 resp. 0,7944). V podmienkach stresu výrazne poklesli priemerné hodnoty oboch parametrov v oboch typoch ošetrovania; po aplikácii inokulantu boli zaznamenané prírastky, obdobne ako pri celkovej dĺžke koreňov. Priemerná hrúbka koreňov inokulovaných rastlín vykazovala pokles v porovnaní s kontrolou v podmienkach optimálnej závlahy, avšak v kontrolnej skupine bez inokulácie priemerná hrúbka koreňov vykazovala výrazný prepad hodnôt v podmienkach stresu (Obr. 2D). Gamalero a kol. (2004) pri rovnakom spôsobe inokulácie výsadbovej jamky udáva nárast celkovej dĺžky koreňového systému, štatisticky významné prírastky makroskopického povrchu a objemu koreňov a zároveň nárast ich počtu, resp. vetvenia.



Obr. 2. Rastové parametre koreňovej sústavy rajčiaka jedlého hodnotené obrazovou analýzou – vplyv inokulácie AMF a stresu zo sucha; štatisticky spracované LSD testom, rozdielne písmená nad šĺpkami označujú štatisticky významné rozdiely pri $\alpha = 0,05$.

3.3 Architektúra koreňovej sústavy

Koreňový systém rastlín rajčiaka, vypestovaných zo semien, je vždy zložený z hlavného koreňa a sústavy jemných rozvetvených vláskovitých sekundárnych koreňov. Základná štruktúra sekundárnych koreňov v pokuse vykazovala prítomnosť vetvenia do tretieho rádu bez ohľadu na úroveň pokusného faktora. Signifikantne najvyšší celkový počet koreňov (Obr. 3A) bol zaznamenaný po aplikácii inokulantu v optimálnych podmienkach pestovania (79,0 ks). Inokulácia v podmienkach stresu kompenzovala nepriaznivé podmienky natoľko, že rastliny mali takmer rovnaký počet koreňov (47,0 ks) ako v optimálnych podmienkach bez podpory inokulantu (51,7 ks). Trend inhibície tvorby nových koreňov bol najviac badaťelný pri variante vystavenom stresu bez inokulantu (36,7 ks).



Obr. 3. Štruktúra koreňového systému rajčiaka – vplyv inokulácie AMF a stresu zo sucha; štatisticky spracované LSD testom, rozdielne písmená označujú štatisticky významné rozdiely pri $\alpha = 0,05$.

Aplikácia inokulantu však výrazne zmenila podiel koreňov prvého a druhého rádu na celkovom počte sekundárnych koreňov (Obr. 3B). Kým v prípade neinokulovaných rastlín bol zaznamenaný vyšší podiel na úrovni koreňov prvého rádu (56,42 %; vs. 34,12 %-ný podiel koreňov druhého rádu), tak po aplikácii inokulantu sa ťažisko presunulo na úroveň koreňov druhého rádu (60,29 %; vs. 31,71 %-ný podiel koreňov prvého rádu). Táto zmena bola štatisticky významná. Korene tretieho rádu vykazovali nízku absolútnu početnosť aj podiel na celku, najmä vzhľadom na vek a vývojové štádium testovaných rastlín. V priemere pokusných variantov boli rozdiely medzi nimi nesignifikantné. Podmienky pestovania nemali vplyv na zastúpenie jednotlivých skupín koreňov (Obr. 3B).

Podobný vplyv mykorízy na koreňovú sústavu rastlín popisujú aj HUANG a kol., (2020) pri rastlinách orechov, kedy aplikácia 5 druhov AMF zvýšila nielen rastové parametre nadzemnej biomasy sadenic, ale aj dĺžku a povrch koreňov. Naproti tomu CARUSO a kol. (2021) pri rastlinách figy pozorovali rovnaký efekt aplikácie AMF pri genotype Natalese, avšak pri genotype Dottato bol vplyv negatívny. Čo sa týka štruktúry koreňového systému, pri genotype Natalese sa po aplikácii AMF zvýšil počet tenkých (0,5 – 2 mm) a veľmi tenkých (< 0,5 mm) koreňov a klesol počet hrubých koreňov, kým pri druhom genotype to bolo opäť naopak. Práve tieto typy

koreňov absorbujú a transportujú živiny z pôdy do rastlín a tým ovplyvňujú produkciu biomasy (McCORMACK a kol., 2015).

Zdroje

1. Abdulkareem, M.T. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for drought tolerance improvement in tomato (*Solanum lycopersicum*). PhD. Thesis. Pan African University Institute for Science, Technology and Innovation, Nairobi, Kenya, 2018, 142 s.
2. Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
3. Caruso, T., Mafrica, R., Bruno, M., Vescio, R., & Sorgonà, A. (2021). Root architectural traits of rooted cuttings of two fig cultivars: Treatments with arbuscular mycorrhizal fungi formulation. *Scientia Horticulturae*, 283, 110083. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110083>
4. Chandrasekaran, M., Boopathi, T., & Manivannan, P. (2021). Comprehensive assessment of ameliorative effects of AMF in alleviating abiotic stress in tomato plants. *Journal of Fungi*, 7(4), 303. <https://doi.org/10.3390/jof7040303>
5. Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P. I., Fall, D., Hocher, V., & Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10), 370. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
6. Gamalero, E., Trotta, A., Massa, N., Copetta, A., Martinotti, M. G., & Berta, G. (2004). Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza*, 14(3), 185–192. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0256-3>
7. Gutjahr, C., & Paszkowski, U. (2013). Multiple control levels of root system remodeling in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00204>
8. Huang, G.-M., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., Xu, Y.-J., & Kuča, K. (2020). Mycorrhizal roles in plant growth, gas exchange, root morphology, and nutrient uptake of walnuts. *Plant, Soil and Environment*, 66(No. 6), 295–302. <https://doi.org/10.17221/240/2020-PSE>
9. Kim, S. J., Eo, J.-K., Lee, E.-H., Park, H., & Eom, A.-H. (2017). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and soil conditions on crop plant growth. *Mycobiology*, 45(1), 20–24. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2017.45.1.20>
10. McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., Helmisaari, H., Hobbie, E. A., Iversen, C. M., Jackson, R. B., Leppäkkö, J., Lusk, J., Norby, R. J., Phillips, R. P., Pregitzer, K. S., Pritchard, S. G., Rewald, B., & Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of belowground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505–518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>
11. Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L.-S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
12. Ronga, D., Caradonia, F., Francia, E., Morcia, C., Rizza, F., Badeck, F.-W., Ghizzoni, R., & Terzi, V. (2019). Interaction of tomato genotypes and arbuscular mycorrhizal fungi under reduced irrigation. *Horticulturae*, 5(4), 79. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040079>
13. Sun, Y., Wang, C., Chen, H. Y. H., & Ruan, H. (2020). Response of plants to water stress: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 11, 978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>
14. Shashtri, T., Tiwari, V., Pereira Kolla, A., Bajpai, R., Sinha, K. & Kolla, A. (2020). Arbuscular mycorrhizae fungi a potential eco-friendly tool for sustainable agriculture under changing climatic conditions/ in biotic and abiotic stress conditions. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 63–76. <https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i32.206>
15. Singh, P. K., Singh, M., & Tripathi, B. N. (2013). Glomalin: An arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. *Protoplasma*, 250(3), 663–669. <https://doi.org/10.1007/s00709-012-0453-z>
16. Veresoglou, S. D., Meneses, G., & Rillig, M. C. (2012). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect the allometric partition of host plant biomass to shoots and roots? A meta-analysis of studies from 1990 to 2010. *Mycorrhiza*, 22(3), 227–235. <https://doi.org/10.1007/s00572-011-0398-7>
17. Volpe, V., Chitarra, W., Cascone, P., Volpe, M. G., Bartolini, P., Moneti, G., Pieraccini, G., Di Serio, C., Maserti, B., Guerrieri, E., & Balestrini, R. (2018). The association with two different arbuscular mycorrhizal fungi differently affects water stress tolerance in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1480. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01480>