

Ph.D. értekezés tézisei

Nehézfém-indukált nitro-oxidatív stressz vizsgálata *Brassica* fajokban

Feigl Gábor



UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Témavezetők:

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna
Egyetemi adjunktus

Prof. Dr. Erdei László
Egyetemi tanár

Biológia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Növénybiológiai Tanszék

2015

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben a különböző geológiai és antropogén hatások miatt a környezetbe került nehézfémek mennyisége radikálisan megemelkedett, így azok többé már nem elhanyagolható stresszfaktorok a növények számára. Minden növény képes a számukra esszenciális fémek felvételére és akkumulációjára (pl. réz, mangán, cink), de olyan, nem-esszenciális elemek felvétele is megtörténik, amelyeknek nincs ismert biológiai funkciója, vagy károsak lehetnek a növényi szervezetekre nézve. A nehézfémstressz – az egyéb stresszorokhoz hasonlóan – morfológiai változásokat indukál a növény hajtás- illetve gyökérrendszerében (stressz-indukált morfogenetikai válaszok). Mivel a gyökér az első növényi szerv, ami a talajoldatban található nehézfémekkel találkozik, így alapvető fontossággal bír a stresszválaszok tanulmányozása során, ezért elsősorban a gyökérrendszerben tapasztalható változások vizsgálatát tűztem ki kutatásom céljául.

Az általam vizsgált két nehézfém, a réz (Cu) és a cink (Zn) esszenciális mikroelem, ám míg a réz redox-aktív (azaz közvetlenül képes reaktív oxigénformák képzésére), addig a cink nem rendelkezik ezzel a tulajdonsággal. Magas koncentrációban mindkettő negatív hatással van a gyökér merisztematikus zónájának életképességére, és így csökkenthetik a gyökérnövekedést, illetve így az egész növény növekedésére negatív hatást gyakorolhatnak. Megfelelő koncentrációban azonban a Zn pozitív hatással van a növekedésre, illetve a Cu serkentheti új merisztematikus régiók és így új oldalgyökerek kialakulását is. A gyökérfejlődést befolyásoló hatásuk mögött többek között a reaktív oxigén (pl. hidrogén-peroxid, szuperoxid gyökkanion)- és nitrogénformák (pl. nitrogén-monoxid, peroxinitrit) metabolizmusának megváltozása áll.

A reaktív oxigénformák (ROF) termelődése a stresszválaszok széles körű kifejeződéséhez kapcsolható, így feltételezhetően azok fontos közvetítő szerepet töltenek be a nehézfémstressz és a stressz-indukált morfogenetikai válaszok kialakulásában, valamint több ponton kapcsolódnak a reaktív nitrogénformák (RNF) jelátviteléhez. Az RNF által kiváltott tirozin nitráció, mint poszttranszlációs módosítás során a peroxinitrit reagál a tirozin aminosavakkal, módosítva a fehérjék szerkezetét, aktivitását. Ezekon kívül a nitrogén-monoxid (NO) mobilis jelmolekulaként is fontos szerepet játszik a gyökérfejlődésben és növekedésben.

A ROF és RNF metabolizmusa számos ponton kapcsolódik egymáshoz, emiatt összesített hatásuk jellemzésére a közelmúltban a növénybiológia területén is megjelent a nitro-oxidatív stressz koncepciója, aminek segítségével új formában jellemezhető például a nehézfémek gyökerekre gyakorolt hatása.

Kutatásaim során a réz és a cink hatását hasonlítottam össze indiai mustár (*Brassica juncea* L. Czern.) és olajrepce (*Brassica napus* L.) növényekben. A két, keresztesvirágúak családjába tartozó faj nagy gazdasági jelentőséggel bír, széles körben termesztik őket olajnövényként, így különösen fontos az abiotikus stressz-toleranciájuk – jelen esetben nehézfém-toleranciájuk – jobb megismerése, összehasonlítása. Gazdasági hasznosításuk mellett léteznek kezdeményezések ezen *Brassica* fajok fitoremediációs felhasználására vonatkozóan is, így a (haszon)növények nehézfém-toleranciájára vonatkozó ismereteink bővítése igen fontos lehet a jövőre nézve, a környezet nehézfémmel való egyre fokozódó szennyezése miatt.

Célkitűzés

Munkám során célul tűztem ki két, gazdaságilag is jelentős *Brassica* faj (*Brassica juncea* és *Brassica napus*) rézzel és cinkkel szembeni érzékenységének, valamint a két fém hatásainak összehasonlítását; a nitrozatív és oxidatív stressz-folyamatok feltérképezését, és ezen másodlagos stresszfolyamatok szerepének tisztázását a nehézfém-tolerancia kialakulásában.

Kutatásaim során a következő kérdésekre kerestem a választ:

1. Mekkora mértékben képesek a vizsgált fajok a két nehézfém felvételére, melyik szervükben képesek akkumulálni azokat, illetve milyen változásokat okoz a réz- illetve cinkkezelés a vizsgált fajok mikroelem-háztartásában?
2. Milyen morfogenetikai változásokat okoz a réz- illetve cinkstressz, megfigyelhető-e a stressz-indukált morfogenetikai válasz kialakulása?
3. Hogyan alakul a *Brassica* fajok nehézfém-toleranciája: milyen sejtfalmódosulásokat indukál a két nehézfém a vizsgált fajok gyökereiben, valamint hogyan változik a gyökércsúcsi merisztéma életképessége a réz- illetve cinkstressz hatására?
4. A réz- és a cinkstressz okoz-e változásokat a RNF metabolizmusában, ROF-kal való interakcióikban, és kialakul-e másodlagos nitrozatív stressz a gyökérzetben? Megfigyelhető-e különbség a két *Brassica* faj esetében a nitroproteom méretének alakulásában?
5. Milyen összefüggés van a réz- és cink-indukált nitrozatív és oxidatív folyamatok valamint a *Brassica* fajok nehézfém-tűrése között?

Anyagok és módszerek

Vizsgált növények és nevelési körülmények

Vizsgálataimat két növényfaj, az indiai mustár (*Brassica juncea*) és az olajrepcé (*Brassica napus*) felhasználásával végeztem. Mindkét faj a keresztesvirágúak (*Brassicales*) rendjébe, a káposztafélék (*Brassicaceae*) családjába tartozik, ahol több nehézfém-toleráns és hiperakkumuláló faj is található, emellett gyorsan nagy biomasszát produkálnak.

Az indiai mustár és olajrepcé magjait felületi fertőtlenítés után perlittel töltött Eppendorf-csövekbe helyeztem, amik teljes Hoagland tápoldatban úsztak. A csíranövényeket kilenc napig előneveltem – ez idő alatt megjelentek első leveleik – majd a tápoldatot lecseréltem, és kiegészítettem 10, 25 és 50 μM réz-szulfát vagy, 50, 150 és 300 μM cink-szulfát oldattal. A kontroll növények réz- és cinkkezelést nem kaptak, a Hoagland tápoldatban nevelkedtek a kísérlet teljes időtartama alatt, ami 0,5 μM CuSO_4 -ot és 5 μM ZnSO_4 -ot tartalmazott. A növények üvegházi körülmények között növekedtek további hét napig, 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fényerősség mellett 12/12 órás sötét/világos ciklusok, 55-60%-os relatív páratartalom és $25 \pm 2^\circ\text{C}$ hőmérséklet mellett.

Elemtartalom-vizsgálat

A mikroelemek mennyiségének méréséhez induktívan csatolt plazma tömegspektrometriát (ICP-MS, Thermo Scientific XSeries II, Asheville, USA). A réz, cink és egyéb mikroelemek koncentrációit $\mu\text{g/g}$ száraz tömegben (SZT) fejeztem ki.

Morfológiai mérések

A 7 nap kezelés után mind a hajtás mind a gyökerek friss illetve száraz tömege (g) mérésre került, csak úgy, mint a főgyökér hossza (cm) és az oldalgyökerek száma (db/gyökér) is.

Mikroszkópos vizsgálatok

A különböző fluorofórokkal festett *Brassica* gyökereket nagy felbontású digitális kamerával (AxioCam HR, HQ CCD, Carl Zeiss, Jena, Németország) felszerelt Zeiss Axiovert 200M inverz mikroszkóppal (Carl Zeiss, Jena, Németország) vizsgáltam, a különböző

festékekhez eltérő filter-szetteket használtam. A gyökércsúcsok merisztematikus zónáinak fluoreszcencia intenzitása (pixel intenzitás) mérése a digitális felvételeken történt az Axiovision Rel. 4.8 szoftver használatával, 100 µm átmérőjű körök területén.

Cinklokalizáció a gyökércsúcsokban

A cink szöveti lokalizációjának kimutatására párhuzamosan két fluoreszcens festéket, a Zinqint (etil(2-metil-8-p-toluénszulfonamido-6-quinolyloxy)acetát) illetve a Zinpyr-1-et (4',5'-Bis[bis(2-piridilmetil)aminometil]-2',7'-diklorofluorescein) használtam.

Sejtszintű cinklokalizáció meghatározása, a sejtfalak/halott sejtek jelölése

A sejtszintű cinklokalizáció meghatározása konfokális lézer-pásztázó mikroszkóppal (Olympus LSM 700, Olympus, Tokyo, Japan) történt. A cink sejtszintű kimutatására használt Zinpyr-1 fluoroforon kívül propídium-jodidot (PI) használtam a sejtfalak valamint a halott sejtek jelölésére.

A fluoreszcensen jelölt minták gerjesztése 488 nm-es, 100 mW-os argonion lézerrel történt, továbbá a minták vizsgálatához egy húszszoros víz immerziós objektívlencsét használtam. A fluoreszcencia emisszió detektálására fluorescein-izotiocianát (FITC) és PI filtereket alkalmaztam. A felvételek készítése a Fluoview FV100 szoftver segítségével történt, elemzésüket pedig a Fiji programmal végeztem el.

Sejtfalmódosulások vizsgálata a gyökérben

A gyökércsúcsi sejtek sejtfalaiba berakódó kallózt anilinkék-festéssel mutattam ki; a sejtfalak lignifikációjának kimutatására a gyökerekben a Wiesner-teszten alapuló sósavas floroglucinol festést alkalmaztam.

Lipidperoxidáció vizsgálata a gyökércsúcsokban

A lipidperoxidáció termékeit (pl. malondialdehidek) a Schiff reagenssel tettem láthatóvá a gyökércsúcsokban.

Gyökércsúcsi merisztémák életképességének vizsgálata

A gyökércsúcsi merisztematikus régió sejtjeinek életképességének meghatározásához fluoreszcein diacetát (FDA) festéket használtam.

Reaktív oxigén- és nitrogénformák kimutatása

A szuperoxid gyökéanion vizualizációjához dihidroetidiumot (DHE); a hidrogén peroxid detektálásához a gyökereket Ampliflu™ (10-acetyl-3,7-dihydroxyphenoxazine, ADHP vagy Amplex Red) festést használtam.

A gyökércsúcsok nitrogén-monoxid tartalmának meghatározásához DAF-FM DA (4-amino-5-metilamino-2',7'-difluorfluoreszcein) festéket, míg a peroxinitrit szintjének méréséhez a gyökércsúcsokban 3'-(p-aminofenil) fluoreszceint (APF) használtam.

Az enzimatisz antioxiáns rendszer elemeinek vizsgálata

A szuperoxid dizmutáz (SOD) (EC 1.15.1.1) aktivitásának mérése a nitroblue tetrazólium klorid (NBT) riboflavin jelenlétében történő fotokémiai bontásának gátlásán alapul, míg az aszkorbát peroxidáz (APX) (EC 1.11.1.11) aktivitásának mérése során az aszkorbáttartalom változását mértem 265 nm-en.

Immunoprecipitáció, SDS-PAGE és Western blot

A teljes fehérjekivonatot nátrium-dodecil-szulfát poliakrilamid gélelektroforézis (SDS-PAGE) előtt Thermo Scientific Pierce Crosslink Magnetic IP/CoIP kittel (Hudson, NH, USA) tisztítottam 3-nitrotirozin elleni antitest felhasználásával. Az immunoprecipitáció után a tisztított kivonatban lévő fehérjéket SDS poliakrilamid gélen elválasztottam, majd a Western blot analízishez az elválasztott fehérjéket polivinilidén-fluorid (PVDF) membránra transzfereltem; transzfer után a membránokat 3-nitrotirozin elleni elsődleges antitesttel inkubáltam (1:2000) 4°C-on egy éjszakán át. Az immuno-detekció a megfelelő, alkalikus foszfáttal konjugált másodlagos antitesttel (1:10000), a sávok előhívása NBT/BCIP reakcióval történt.

Eredmények összefoglalása

Ph.D. munkám során a réz és a cink hatását hasonlítottam össze *Brassica juncea*-ban és *Brassica napus*-ban. Kutatásaim során e két faj nehézfémstresszre adott válaszait vizsgáltam morfológiai, biokémiai és molekuláris szinten. Elvégeztem a nehézfémstressznek kitett növények fémfelvételének és mikroelem-háztartásának vizsgálatát, tanulmányoztam a stressz-indukált morfogenetikai válaszok kialakulását, az ezek háttérében húzódó egyes folyamatokat, mint a sejtfalmódosulásokat, az életképesség változását és a ROF és RNF metabolizmusában bekövetkezett változásokat, azok viszonyát.

A munkám során kapott eredményeim alapján megállapítható, hogy:

1. A rézzel és cinkkel kezelt növények elemtartalmának vizsgálata alapján mindkét nehézfémre igaz, hogy a vizsgált fajok jó hatásfokkal képesek azokat felvenni, emellett ezek a gyökérben akkumulálódnak. A hajtásba történő transzportról elmondható, hogy a cink egy nagyságrenddel nagyobb mennyiségben transzlokálódott a fajok hajtásaiba, mint a réz; valamint mind a réz-, mind a cinkkezelés megzavarta a két vizsgált faj gyökereinek Cu/Zn, Fe és Mn-háztartását.
2. A legalacsonyabb koncentrációjú alkalmazott rézkezelés mindkét faj esetén, míg a legenyhébb cinkkezelés csak a *B. napus* esetén váltotta ki a stressz-indukált morfogenetikai válasz összes tünetének megjelenését. Ezen kívül megállapítható, hogy a rézstresszre mindkét faj, míg cinkstresszre csak a *B. napus* gyökérrendszerének növekedése bizonyult érzékenynek.
3. A réz és a cink eltérő sejtfalmódosulásokat okozott a két vizsgált faj gyökereiben. A rézstressz ligninberakódást indukált az oldalgyökerek eredési zónájában, ami hidrogén-peroxid- asszociáltnak bizonyult, miközben cink hatására nagy mennyiségű kallóz adódott a gyökércsúcsokat alkotó sejtek sejtfalaihoz. A gyökércsúcsi merisztéma életképességének vizsgálata alapján elmondható, hogy a réz és a cink eltérő mértékben csökkent az életképességét. Réz hatására ez mindkét faj esetében jelentősen csökkent, míg a cinkstressz nem befolyásolta érdemben a *B. juncea* gyökércsúcsainak életképességét, és a *B. napus* esetén tapasztalt csökkenés is jóval enyhébbnek bizonyult, mint amit rézstressz esetén tapasztaltam.

4. Eredményeim fényt derítettek a réz- és a cinkstressz hatására bekövetkező változásokra a ROF és RNF homeosztázisában. Réz hatására a gyökércsúcsokban található NO mennyisége *B. juncea* esetén enyhén megemelkedett, míg *B. napus* esetén csökkent, és bár a peroxinitrit mennyisége mindkét faj esetén szignifikánsan emelkedett, a fehérje tirozin nitráció mértékében nem tapasztaltam emelkedést, azaz a nagymértékű oxidatív stressz jelenléte ellenére nem beszélhetünk nitro-oxidatív stresszről.

Ezzel szemben cink hatására mindkét vizsgált faj gyökerében megemelkedett mind a NO mind a peroxinitrit mennyisége, és bennük tapasztalható oxidatív stressz eltérő mértéke ellenére mindkét esetben fokozódott a fehérje tirozin nitráció mértéke.

5. Kutatásaim alapján elmondható, hogy az oxidatív stressz meghatározó szerepet játszik a két vizsgált *Brassica* faj nehézfém-érzékenységében. Ahol nem alakult ki oxidatív stressz, ott a gyökér növekedésének gátlása elmaradt, azaz a növény jobban tolerálta a nehézfémstresszt (jelen esetben a *B. juncea* a cinkstresszt). Az eredmények alapján az is feltételezhető, hogy a két faj réz- és cink-érzékenysége inkább függ az oxidatív stressz mértékétől illetve meglététől, mint a nitrozatív stressz folyamatokétól.

Az eredményeket összefoglalva elmondható, hogy mindkét faj képes volt életben maradni magas réz- és cinkkoncentrációk mellett, ráadásul képesek voltak a nehézfémek felvételére is a gyökérükbe, habár a legtöbb esetben ez súlyos növekedésgátlást okozott. Ez alól kivételt képez a cinkkezelésnek kitett *B. juncea*, ahol sem a gyökércsúcsi merisztéma életképessége, sem a gyökérrendszer növekedése nem szenvedett el gátlást. Összességében tehát mindkét általam vizsgált faj mérsékelt réz és cink toleránsnak nevezhető ebben a fiatal életkorukban is. Ennek hátterében különböző szerv- és sejtszintű toleranciamechanizmusok állnak. Jellemző egyrészt a nehézfémek kizárása a hajtásból a transzlokáció minimalizálásával, másrészt pedig a gyökérzet morfológiai adaptációja alacsony koncentrációjú fémkitettség esetén, a jobb víz- és tápanyagfelvétel, azaz a túlélés érdekében. Sejtszinten a gyökér sejtjei igyekeznek kizárni a két vizsgált nehézfémet a citoplazmájukból, ezt rézstressz esetén lignifikáció, míg cinkstressz esetén kallózberakódás segíti, emellett cinkkezelés esetén kimutattam annak megkötését a sejt falban is.

Bár a két fém által *B. juncea* gyökereiben okozott változások a ROF és RNF mennyiségében hasonló tendenciát mutattak, fontos különbség, hogy cink hatására nem alakul ki lipidperoxidáció, azaz oxidatív stressz. Ezzel szemben minden egyéb esetben (rézstressz hatására mindkét fajban, valamint cinkstressz alatt *B. napus* esetén) megfigyelhető valamilyen mértékű lipidperoxidáció, és így oxidatív stressz, ez pedig a gyökérnövekedés gátlásával párosul. A RNF mennyiségének változása alapvetően fajspecifikusnak bizonyult (*B. juncea* esetén erősebb, míg *B. napus* esetén gyengébb emelkedés); ez rézstressz hatására nem okozta a fehérje tirozin nitráció fokozódását, miközben cink hatására mindkét fajban jelentős emelkedést tapasztaltam.

A kutatásaim során elért eredményekből jól látszik, hogy a nehézfémstressz hatására bekövetkező morfológiai változások mögött szerteágazó változások állnak, kezdve az elemtartalom megváltozásától egészen a nitrozatív valamint oxidatív stressz kialakulásáig.

Véleményem szerint az elvégzett kísérleti munkámmal hozzá tudtam járulni az abiotikus stressz (nehézfém stressz) hatására kialakuló nitro-oxidatív stressz összefüggéseinek jobb megismeréséhez.

- **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Lehotai Nóra, Tugyi Nóra, Molnár Árpád, Ördög Attila, Szepesi Ágnes, Gémes Katalin, Laskay Gábor, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress.
Ecotoxicology and Environmental Safety, 94 (2013) 179–189. **IF: 2,482**
- **Feigl Gábor**, Lehotai Nóra, Árpád Molnár, Attila Ördög, Marta Rodríguez-Ruiz, José M. Palma, Francisco J. Corpas, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2015) Zinc induces distinct changes in the metabolism of reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS) in the roots of two *Brassica* species with different sensitivity to zinc stress.
Annals of Botany – elfogadva, doi: 10.1093/aob/mcu246. **IF: 3,654**

Az értekezés témáját bemutató tartott konferencia-előadások, poszterek

- **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Pető Andrea, Lehotai Nóra, Szepesi Ágnes, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2012) Studying the effect of copper in *Brassica juncea* and *Brassica napus* root tips: metabolism of reactive oxygen and nitrogen species and morphological adaptation.
7th Scandinavian Plant Physiology Society PhD Student Conference, Szeptember 12-15, Laulasmaa, Észtország
- **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Pető Andrea, Lehotai Nóra, Ördög Attila, Molnár Árpád, Kolbert Zsuzsanna, Erdei László (2012) The effect of zinc on the microelement homeostasis and the metabolism of reactive signal molecules in *Brassica juncea* and *Brassica napus*.
Third Annual Workshop of COST Action FA 0905 – Mineral improved crop production for healthy food and feed, Október 23-26, Lisszabon, Portugália
- **Feigl Gábor**, Lehotai Nóra, Molnár Árpád, Marta Rodríguez-Ruiz, José M. Palma, Francisco J. Corpas, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2014) Zinc induced a nitro-oxidative stress in roots of *Brassica* species.
5th Plant NO Club Meeting, Július 24-25, München, Németország
- **Feigl Gábor**, Pető Andrea, Lehotai Nóra, Molnár Árpád, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2013) Comparison of the effect of copper and zinc in *Brassica juncea* and *Brassica napus* roots: Microelement homeostasis, metabolism of reactive signal molecules and morphological adaptation.
Biomedica Miniconference, December 13, Szeged, Magyarország
- **Feigl Gábor**, Lehotai Nóra, Molnár Árpád, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2014) Detection of protein tyrosine nitration in zinc-treated *Brassica* plants.
Societas Biologiae Plantarum Hungarica, 11th Congress, augusztus 27-29, Szeged, Magyarország

Egyéb publikációk

- **Feigl Gábor**, Szöllösi Réka, Mihalik Erzsébet (2010) Studies on established *Acorus calamus* (L.) populations.
Acta Biologica Szegediensis Volume 54, Number 2, 2010.
- Kolbert Zsuzsanna, Pető Andrea, Lehotai Nóra, **Feigl Gábor**, Ördög Attila, Erdei László (2012) In vivo and in vitro studies on fluorophore-specificity.
Acta Biologica Szegediensis. 56(1):37-41.
- Kolbert Zsuzsanna, Pető Andrea, Lehotai Nóra, **Feigl Gábor**, Erdei László (2012) Long-term copper (Cu^{2+}) exposure impacts on auxin, nitric oxide (NO) metabolism and morphology of *Arabidopsis thaliana* L.
Plant Growth Regulation. 68(2): 151- 159. **IF: 1,67**
- Lehotai Nóra, Kolbert Zsuzsanna, Pető Andrea, **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Tari Irma, Erdei László (2012) Selenite-induced hormonal and signalling mechanism during root growth of *Arabidopsis thaliana* L.
Journal of Experimental Botany, Vol. 63, 15:5677-5687. **IF: 5,24**
- Pető Andrea, Lehotai Nóra, **Feigl Gábor**, Tugyi Nóra, Ördög Attila, Gémes Katalin, Tari Irma, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2013) Nitric oxide contributes to copper tolerance by influencing ROS metabolism in *Arabidopsis*.
Plant Cell Reports, 32(12), 1913-1923. **IF: 2,93**
- **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Lehotai Nóra, Molnár Árpád, Rácz Éva, Örgöd Attila, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna, Laskay Gábor (2015) Comparing the effects of excess copper in the leaves of *Brassica juncea* (L. Czern) and *Brassica napus* (L.) seedlings: growth inhibition, oxidative stress and photosynthetic damage.
Acta Biologica Hungarica 66(2), pp. 205–221. **IF: 0,589**
- Kolbert Zsuzsanna, Pető Andrea, Lehotai Nóra, **Feigl Gábor**, Erdei László (2015) Copper sensitivity of *nia1nia2noa1-2* mutant is associated with its low nitric oxide (NO) level.
Plant Growth Regulation – elfogadva, doi: 10.1007/s10725-015-0059-5. **IF: 1,67**
- **Feigl Gábor**, Kolbert Zsuzsanna, Lehotai Nóra, Molnár Árpád, Ördög Attila, Bordé Ádám, Laskay Gábor, Erdei László – Different zinc sensitivity of *Brassica* organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern.
Biometals (IF: 2,503) benyújtva
- Lehotai Nóra, Lyudmila Lyubenova, Peter Schröder, **Feigl Gábor**, Ördög Attila, Szilágyi Kristóf, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna - Nitro-oxidative stress contributes to selenite toxicity in pea (*Pisum sativum* L.)
Plant and Soil (IF: 3,235) benyújtva

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy a Feigl Gábor (Jelölt) hozzájárulása a megnevezett közleményekhez jelentős volt. Kijelentem, hogy a Jelölt által végzett kísérletek eredményét a társszerzők tudományos fokozat megszerzéséhez nem használták fel, és ezt a jövőben sem fogják megtenni.

- **Feigl Gábor**, Devanand Kumar, Lehotai Nóra, Tugyi Nóra, Molnár Árpád, Ördög Attila, Szepesi Ágnes, Gémes Katalin, Laskay Gábor, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress.
Ecotoxicology and Environmental Safety, 94 (2013) 179–189. **IF: 2,482**
- **Feigl Gábor**, Lehotai Nóra, Árpád Molnár, Attila Ördög, Marta Rodríguez-Ruiz, José M. Palma, Francisco J. Corpas, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2015) Zinc induces distinct changes in the metabolism of reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS) in the roots of two *Brassica* species with different sensitivity to zinc stress.
Annals of Botany – elfogadva, doi: 10.1093/aob/mcu246. **IF: 3,654**



Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna
Egyetemi adjunktus, témavezető



Prof. Dr. Erdei László
Egyetemi tanár, témavezető