

A MUNKA ELŐZMÉNYEI, A KITŰZÖTT CÉLOK

A XX. század emberiségének egyik legsúlyosabb problémája a környezetszennyezés. Napjaink iparának szennyezőanyagai nemcsak mennyiségükben különböznek a megelőző időszak természetben előforduló, ásványi és biológiai anyagaitól, hanem minőségükben is: a radioaktív ásványok feldolgozása, felhasználása (ipari nyersanyag, energiaforrás, hadianyagok) következtében megjelentek, pl. a radioaktív szennyezések a talajban, vízben és a levegőben.

Az elmúlt két évszázad alatt az ipari társadalmak oly módon változtatták meg a Földön a kémiai körfolyamatokat, hogy ennek beláthatatlan ökológiai és ökonómiai következményei vannak és lesznek. Itt elsősorban három tényezőnek van szerepe: az éghajlati változások következtében, valamint az erózió és a defláció hatására bizonytalanná válik az élelmiszer-ellátásunk, a légszennyezés és a savas esők erdőpusztulást okoznak és megváltoztatják a talaj kémiai összetételét, valamint a vegyi környezetszennyezés veszélyezteti az emberi egészséget. A környezetvédelmi szempontokból káros emberi tevékenységek következtében környezeti elemeink (a levegő, a víz, a talaj) összetétele olyan minőségi és mennyiségi változáson mentek keresztül, amelyet nagyon nehéz kontrollálni. Tekintettel arra, hogy a Zr különböző vegyületei a talajban széles koncentráció-tartományban megtalálhatók (30-2000 mg/kg, a Föld 20. leggyakoribb eleme), számolnunk kell azzal, hogy a környezeti elemek nehezen követhető kémiai összetételének változása olyan vegyületformák kialakulását teszi lehetővé, amelyek a növények számára felvehetőek s így bekerülve a táplálékláncba állat- és humán-egészségügyi problémákat okozhatnak.

A talajban található mikroelemek közül koncentráció szempontjából megelőzi a nikkelt, cinket, rézet és ólmot.

A nagyszámú nukleáris kísérletek, valamint a különböző kisebb-nagyobb atomreaktor-balesetek miatt a természetben feldúsult a cirkónium 95 és 93 tömegszámú radioaktív izotópja. A 95 tömegszámú izotópnak 65 nap, a 93 tömegszámúnak $1,5 \cdot 10^6$ év a felezési ideje. Így számolnunk kell a talaj radioaktív Zr-koncentrációjának növekedésével. A jelenség azért is figyelemreméltó, mert a nukleáris baleseteknél legnagyobb mennyiségben keletkező 95 tömegszámú izotóp igen mozgékony, s a talajba kerülő radioaktív elem mennyiségének 95%-a rendkívül gyorsan abszorbeálódik a területen található növényekben.

Cirkónium-aszkorbát komplex hatását első kísérleteink során *Saccharomyces cerevisiae* (humán táplálkozás) és *Candida utilis* törzseken (állati takarmányozás) vizsgáltuk.

Mindkét törzs jelentős mértékben akkumulálta a cirkóniumot, fejlődésükben még a 2 mM Zr-koncentráció sem okozott gátlást. A kezelés hatására megváltozott az élesztőtörzsek elem- és aminosav-összetétele. Enzimaktivitást gátló hatása jelentősen kisebbnek mutatkozott, mint amelyet a titán illetve a réz esetében mértek.

A továbbiakban vizsgálatainkat *Chlorella pyrenoidosa* zöldalgán végeztük, amelynél hasonlóan az élesztőtörzsekhez, jelentős mértékű cirkónium-akkumulációt tapasztaltunk. A kezelés hatására csökkent a fotoszintetikus pigmentek koncentrációja, és új színanyag-származékok jelentek meg a sejtkivonatokban. A zöldalga elemösszetétele szignifikánsan változott. A cirkónium nem gátolta a zöldalga növekedését.

Kutatásaink során tisztázni kívántuk, hogy milyen hatással van a cirkónium-aszkorbát a magasabb rendű növények fejlődésére. Vizsgálatainkat *Triticum aestivum* L. Mv. 20 búzafajtaival végeztük. A Zr-ASC adagolási kísérletek során a következő kérdésekre kerestük a választ:

- Képes-e a gyökér a Zr-ot felvenni, és az akkumuláció mellett tapasztalható-e transzlokáció?
- Van-e toxikus hatása a cirkóniumnak a vizsgált koncentráció-tartományban?
- A kezelés okoz-e változást a minták elemkoncentrációjában, különös tekintettel a növényélettani szempontból esszenciális mikroelemekre, s ha igen, mi magyarázhatja ezt a hatást?
- Tapasztalható-e változás a minták aminosav-összetételében, s ha igen mi magyarázhatja ezt a hatást?
- A Zr-ASC-nak van-e hatása a növényi anyagcsere egyik legjelentősebb folyamatára, a klorofill bioszintézisére?
- Mérhető-e változás a minták összfenol koncentrációjában, valamint bizonyos antioxidáns hatású enzimek aktivitásában?
- Mennyiben hasonlítható össze a Zr-ASC növényélettani hatása az ilyen szempontból már ismert mikroelemek hatásával?
- Részt vesz-e a Zr-ASC a növény védekezési mechanizmusában, kadmium-szennyezés esetén?

ANYAG ÉS MÓDSZER

Növényanyag, nevelési körülmények

A Zr-ASC hatásának vizsgálatához öt napig sötétben majd négy napig természetes megvilágítás mellett, szobahőmérsékleten, tápoldatban nevelt *Triticum aestivum* L. Mv. 20 búzanövényeket használtunk. A tápoldat alapja a Knopp-oldat volt.

Első kísérletünknel a Knopp oldatot különböző koncentrációjú (10-550 μM) Zr-ASC oldattal egészítettük ki, kontroll oldatnak a kálium-aszkorbáttal dúsított Knopp oldatot használtunk.

Második kísérletünknel a Knopp oldat a különböző Zr-koncentrációk (10-55 μM) mellett 200 μM Cd-sót is tartalmazott.

Harmadik kísérletünknel a növények Knopp oldatban fejlődtek, a Zr-ASC oldatot levélpermetezés formájában juttattuk a növényre.

Mikroelemforrás

Cirkónium forrásként szervesetlen cirkónium-oxi-klorid ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$) sóból aszkorbinsavval előállított komplex vegyületet használtunk. A vegyület előállítása során 1:10 molarányú ligandumfelesleget alkalmaztunk. A vegyület pontos összetétele és szerkezete még nem ismert. A komplexvegyület kialakulása időreakció, 5-6 napot vesz igénybe. Ezt követően az oldat pH-ja 10 m/m% KOH oldattal a kísérletekhez szükséges értékre (pH=7) beállítható.

Növekedési paraméterek mérése

A cirkónium okozta hatás vizsgálatokor meghatároztuk a csírázási százalékot, a búzanövények levelének és gyökerének hosszúságát, valamint a friss és a szárazanyag tartalmat. A szárazanyag-tartalom meghatározásához 104°C-on, tömegállandóságig szárítottuk a mintákat.

Elemösszetétel meghatározása

A minták Zr-koncentrációját Arsenazo III reagens felhasználásával 665 nm hullámhossznál ($\epsilon=120 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) erősen savas közegben (8 M sósav) spektrofotometriás módszerrel mértük. Tekintettel arra, hogy irodalmi adat nem állt rendelkezésünkre a búza Zr-akkumulációs készségéről, a Zr mérésénél standard addíciót alkalmaztunk. (mérési tartomány: 0,05-1,0 mg/l, a kimutatási határ 2,5 $\mu\text{g/g}$ sz.a. Zr).

A tápoldatok és a növények elemtartalmát ICP-OES módszerrel határoztam meg.

Biogén aminok meghatározása

Az extrahált és szűrt mintákat automata aminosav analizátor segítségével határoztuk meg.

Klorofilltartalom mérése

A minták klorofill tartalmát a 80 v/v%-os acetonnal extrahált majd szeparált levélmintákból 644 nm és 663 nm hullámhosszon, spektrofotometriás módszerrel mértük és számoltuk.

Összfenol-tartalom meghatározása

A minták összfenol-tartalmát fotometriás módszerrel, galluszsav kalibrációs görbe segítségével $\lambda = 760$ nm hullámhosszon határoztuk meg.

Enzimaktivitás meghatározása

Az enzimaktivitások meghatározása a növényi szövetek sejtmentes extraktumából történt. A levágott növényi részeket (levél, illetve gyökér) homogenizáltuk, majd centrifugálást követően a felülúszóból spektrofotometriás módszerrel mértük.

- Gvajakol-peroxidáz

A gvajakol szubsztrátból keletkező tetragvajakol termék keletkezését a $\lambda=470$ nm-nél ($\epsilon= 26,6 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) bekövetkező abszorbanciaváltozás követésével határoztuk meg.

- Aszkorbinsav-peroxidáz

Az aszkorbinsav szubsztrát enzimkatalizálta oxidációját a $\lambda=290$ nm hullámhossznál ($\epsilon= 2,8 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) történő abszorbanciaváltozás követésével mértük.

- Glutation-reduktáz

5,5'-ditio-bisz-(2-nitrobenzoésav) szubsztrátot alkalmazva $\lambda=412$ nm hullámhosszon ($\epsilon= 14,15 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) mért abszorbancia változással határoztuk meg.

Statisztikai módszerek

A kezeléseket minden esetben három, időben és kezeléson belüli független ismétlésben végeztük. Az eredmények kiértékelése során a Microsoft Excel táblázatkezelő program két-mintás t-próba nem azonos szórásnégyzeteknél /Welch-próba/ statisztikai függvényét használtuk fel. Minden esetben 95%-os megbízhatósági szintet vettünk figyelembe.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

ZR-ASC HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Növekedési paraméterek

A kísérletek során 10, 33, 55, 100 és 550 μM Zr-ASC kezelésnek búza csíranövény fejlődésére gyakorolt hatását vizsgáltam. A növekedési paraméterek szempontjából csak a legnagyobb koncentrációjú kezelések bizonyultak káros hatásúnak. Ezek hatására szignifikánsan csökkent a csírázási százalék, valamint a gyökér és a levél mérete, ugyanakkor szignifikáns növekedés tapasztalható mind a gyökér, mind a levél szárazanyag-tartalmában. A cirkóniumot 100 és 550 μM koncentrációban tartalmazó tápoldatban a búza csíranövény fejlődése gátolt, a nagy Zr-koncentráció a növény produktivitását korlátozó, abiotikus stressztényezőnek tekinthető.

Cirkónium akkumuláció, transzlokáció

A különböző Zr-koncentrációjú tápoldatokból a búza csíranövény képes felvenni a cirkóniumot. A gyökérmintákban akkumulálódott Zr mennyisége összefüggést mutat a tápoldat Zr-koncentrációjával. A tápanyagfelvétel során nemcsak a gyökérben való akkumuláció, hanem a növényen belüli gyökér \rightarrow levél transzlokáció is megfigyelhető. A transzlokáció mértéke 100 μM Zr-ASC kezelésnél éri maximális értékét (a levélben 261 μg Zr/g sz.a., SD=4,8; a gyökérben ugyanekkor 286 μg Zr/g sz.a SD=5,6).

A gyökér és a levél Zr-koncentrációja a kisebb Zr-ASC kezelések esetében is azonos nagyságrendű érték. Ez a viszonylag nagymértékű transzlokáció feltételezhetően azzal magyarázható, hogy az aszkorbinsav a cirkóniummal stabil, semleges töltésű komplex molekulát hoz létre. Elképzelhető, hogy az aszkorbinsav mintegy „védőburkot” képez a Zr körül, ezáltal csökkenti annak lehetőségét, hogy a sejtfal negatív töltésű csoportjaihoz kapcsolódjon. A komplex szerkezetére vonatkozó elméletgyelőre feltételezés, kísérletileg nem bizonyított.

A maximális Zr-terhelés hatására a gyökérben egy nagyságrenddel nagyobb Zr-tartalom (1316 $\mu\text{g/g}$ sz.a.) mérhető, mint az ennél kisebb koncentrációjú kezelések esetében. A levél Zr-tartalma azonban a 100 és 550 μM Zr-ASC kezelés hatására gyakorlatilag nem változik. Mindez arra utal, hogy az 550 μM Zr-ASC kezelés jelentős mértékben károsítja a sejtmembránt, melynek következtében a Zr aktív transzportfolyamatát a passzív felvétel váltja fel: a fém diffúzió útján a szövetekbe áramolhat. A hajtásokba történő transzport gátlása a növény föld feletti részeinek védelmére utalhat.

Aminosav-tartalom

A különböző koncentrációjú Zr-ASC kezelések hatására megváltozik a növény aminosav komponenseinek aránya, és az összaminosav-koncentráció értéke. Mind a gyökérmintákban, mind a levélmintákban szignifikánsan nőtt az összaminosav-koncentráció. Az egyes aminosavak közül az alanin (levélben), aszparaginsav, glutamin, Ser⁺ (szerin + threonin+ aszparagin + glutamin), és GABA (levélben) koncentráció-növekedése a legjelentősebb.

A kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy a Zr-ASC-nak az aminosav koncentrációra gyakorolt hatása teljes mértékben összhangban áll a Ti-ASC-tal végzett kísérletek eredményeivel.

Az egyes aminosav-komponensek jelentős koncentráció-növekedése alapján lehetséges, hogy a Zr-ASC közvetett hatással van a citrátkörre, ugyanis a nagymértékben megnövekedett alanin, treonin és Ser (Ser⁺ koncentráció) tartalom átalakulása révén nagyobb mennyiségű piroszőlősav képződését eredményezheti.

Klorofill-tartalom

Megállapítható, hogy a búza csíranövény klorofill-tartalma a Zr-ASC kezelés hatására szignifikánsan nő és még a legnagyobb koncentrációjú Zr-terhelés esetében is magasabb (nem szignifikáns eltérés) a kontrollhoz képest. Bár egyéb szempontok alapján (növekedési paraméterek, elemösszetétel) a 100 és 550 µM koncentráció-tartomány már toxikusnak tekinthető, a növények fotoszintetikus rendszere nem károsodik, klorotikus tünetek nem észlelhetők.

Lehetséges, hogy a Ti-ASC-tal végzett kísérleteknél feltételezett hatásához hasonlóan az alacsony Zr³⁺/Zr⁴⁺ redoxpotenciál növeli a Fe²⁺ mennyiségét az elektrontranszport láncban, ezáltal stimulálja a klorofill szintézisét és a pigment bioszintézist, ugyanakkor gátolja az enzimátikus degradációt.

Összfenol-tartalom

A növényt érő stresszhatásra, védekező reakcióként a növények összfenol-tartalmuk növekedésével reagálnak. Vízkultúrák növénykísérleteknél érthető módon a gyökérminták esetében várnánk ezt a reakciót. Vizsgálataink során meglepő módon nem ez tapasztalható, a búza csíranövény gyökérmintájában az összfenol-tartalom szignifikánsan csökken, függetlenül a tápoldat Zr-koncentrációjától. A jelenség valószínűleg összefüggésben áll a gyökérminták Zn, Mn és Cu koncentrációjában bekövetkező növekedéssel. Ezen elemek koncentrációnövekedése és a minta összfenol-tartalmának csökkenésének kapcsolatát már más kísérletnél is tapasztalták.

Enzimaktivitás változása

A gvajakol-perxidáz (POD), az aszkorbinsav-peroxidáz (APX) és glutation-reduktáz (GR) aktivitásának emelkedése egyértelmű oxidatív stresszhatásra utal.

A POD enzim aktivitásának értékeit vizsgálva megállapítható, hogy a legnagyobb koncentrációjú Zr-ASC kezelés egyértelmű stresszreakciót vált ki a növényben. A POD aktivitása a gyökérben és a levélben, a kontroll értékhez képest több mint háromszorosára növekedett.

Érdemes megemlíteni, hogy a gyökér és a levél esetében egyaránt a 100 és 550 μM Zr-koncentráció hatására bekövetkező, nagy mértékű POD-aktivitás emelkedéssel párhuzamosan az összfenol mennyiségében jelentős csökkenés tapasztalható. A lignin bioszintézisének egyes lépéseit a POD izoenzimjei katalizálják, mely folyamatban az enzim különféle fenolos vegyületeket is szubsztrátként hasznosít.

Mindez arra utal, hogy a megnövekedett POD-aktivitás elsősorban a lignifikációban résztvevő izoenzimek aktivitásemelkedéséből származik, amit más környezetszennyező fémek hatására is leírtak korábban.

A nagyobb mértékű lignindepozícióval az enzim a növény fémfelvételét fizikailag akadályozni, gátolni képes.

A nagymértékű lignifikáció azonban a gyökérsejtek rigiditását növeli, ami a növekedés gátlásához vezet, ahogyan az a nagy Zr-koncentráció gyökérnövekedésre gyakorolt hatásában is világosan megmutatkozott.

A növények fejlődése is a POD aktivitásban mért változást támasztja alá, mert a növények mérete, külső megjelenése egyértelműen jelzi a stresszhatást.

A nagy koncentrációjú Zr-ASC kezelés hatására megnövekedett APX- és GR-aktivitás arra utal, hogy ilyen mértékű Zr-ASC kezelés hatására a növényi sejtek jelentős mértékű oxidatív stresszhatást szenvednek el.

ZR-ASC HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA CD TARTALMÚ TÁPOLDAT ESETÉN

Növekedési paraméterek

A 200 μM Cd hatására csökkenő csírázási százalék, a gyökér és a levél hosszában bekövetkezett jelentős mértékű csökkenés, valamint a szárazanyag-tartalomban tapasztalt nagymértékű növekedés a Cd okozta toxikus hatással magyarázható.

A csírázási százalék értékében bekövetkezett csökkenést a Zr-ASC kezelés képes szignifikáns mértékben ellensúlyozni, nagymértékben csökkentette a Cd okozta stresszhatást, de teljes mértékben nem kompenzálta.

A kadmiumkezelt növény gyökerének és levelének méretbeli csökkenését az 10 és 33 μM Zr-ASC kezelés szignifikánsan csökkentette, de már az 55 μM Zr-koncentrációnál ez a hatás nem érvényesül.

A Cd-kezelt növények szárazanyag-tartalmában bekövetkezett növekedés összefüggésben áll azzal, hogy a nehézfémek kedvezőtlenül befolyásolják a növények vízháztartását. A különböző koncentrációban jelenlevő Zr ellensúlyozza ezt a hatást, ezáltal szignifikánsan csökkenti a gyökér és a levélminták szárazanyag-tartalmát.

Cirkónium és kadmium akkumuláció, transzlokáció

A cirkónium transzlokációja a tápoldatból a gyökérbe igen nagy mértékű, a gyökérmintákban mért Zr-koncentráció nagyságrenddel nagyobb, mint a hasonló körülmények között, de Cd nélkül végzett kísérleteknél.

A jelenség hátterében a Zr és Cd közötti esetleges antagonista hatás állhat, s a búza csíranövény a toxikus kadmiumot érzékelve, védekező folyamatként, nagyobb mértékben dúsítja fel a cirkóniumot. Hasonló folyamatot már tapasztaltak a Cd és a Cu, valamint a Cd és Zn között, amikor az élő szervezet megfelelő Cu- illetve Zn-ellátottság mellett képes kompenzálni a Cd toxikus A jelenséget a kísérletek során magunk is tapasztaltuk, a Cd-tartalmú tápoldatban nevelt növény gyökerében mind a réz, mind a cink- koncentráció jelentősen megnő (előbbi esetében közel ötszörös, utóbbi esetében majdnem háromszoros a növekedés), amely jelenség védekezési mechanizmusként értelmezhető. Ez a megnövekedett Cu- és Zn-koncentráció Zr jelenlétében szignifikánsan csökken. Az említett fémionok koncentrációváltozása is alátámasztja a $\text{Zr} \leftrightarrow \text{Cd}$ antagonista hatást, ugyanis a tápoldatban jelenlevő Zr-ASC a gyökérben akkumulálódva át tudja venni részben a Cu és a Zn védekezésben betöltött feladatát.

A cirkónium gyökér \rightarrow levél irányú transzlokációja nagymértékben csökkent, amely folyamat feltételezéseink szerint azzal magyarázható, hogy a Cd gátolja a növény vízfelvételét és a növényen belüli vízmozgást, így a vízőldható tápanyagok – jelen esetben a Zr-ASC-transzlokációja is gátolt.

A búza csíranövényben a gyökér jelentős mennyiségű kadmiumot akkumulált. A levélmintáknál a Cd esetében is tapasztalható a gátolt transzlokáció, amely véleményünk szerint alátámasztja a Zr és a Cd közötti ionkompetíció elméletét.

Klorofill-tartalom

A Cd-tartalmú tápoldatban nevelt növények klorofill-koncentrációját a Cd jelentősen csökkentette. Ennek oka lehet a klorofill bioszintézisének gátlása, az LHCII fénybegyűjtő fehérjekomplex bioszintézisének gátlása vagy az oxidatív károsodás. A nagymértékű káros hatást a Zr jelenléte nem tudta teljes mértékben ellensúlyozni, de a 33 μM koncentrációjú kezelés esetén szignifikánsan magasabb klorofilltartalom tapasztalható.

A 33 μM Zr-koncentráció esetében a levelek vastartalma is szignifikánsan növekedett a Cd-kontroll növények levelének vastartalmához képest. A klorofilltartalom növekedése tehát a vas intracelluláris akkumulációjával, a Fe^{2+} ionok esetleges nagyobb mértékű jelenlétével függhet össze. Ezek a kisméretű ionok (Ti, Zr) kiszorítják a kötőhelyekről az elraktározott vasat, így több vas képes részt venni a biokémiai folyamatokban (pl. a klorofill bioszintézisében), ahogyan azt a Ti klorofilltartalom növekedését kiváltó hatása esetén is valószínűsítették.

Összfenol-tartalom

A kadmium-tartalmú tápoldatban nevelt búza csíranövény gyökerében és levelében mért összfenol tartalom növekedése egyértelműen jelzi a növényt érő stresszhatást. Ezt a hatást a 33 és 55 μM Zr-koncentráció kismértékben csökkenti, jóllehet az alkalmazott Zr-ASC kezelésekkel nem lehet teljes mértékben ellensúlyozni a Cd-okozta stresszhatást.

Enzimaktivitás változása

A kadmium közvetlenül nem képez aktív oxigénformákat, mint például a réz, de néhány enzim aktivitásának fokozása révén mégis oxidatív stresszt okozhat.

A Cd-tartalmú tápoldatban nevelt növény gyökerében is és levelében is nagymértékű növekedés tapasztalható mindhárom vizsgált enzim (POD, APX, GR) aktivitásértékében, ami arra utal, hogy a növényt jelentős mértékű oxidatív stresszhatás érte. A gyökérmintáknál a 10 és 33 $\mu\text{mol/ml}$ Zr-ASC kezelés szignifikánsan csökkenti a POD- és az APX-enzimaktivitás értékét. Ez azt jelenti, hogy a kis Zr-koncentrációjú tápoldat képes enyhíteni a Cd okozta káros hatást.

A 10 és 33 μM Zr-koncentrációval kiegészített Cd-tartalmú tápoldatban fejlődött növények levelében jelentősen kisebb mértékű az APX- és GR-aktivitásának emelkedése, mint a Cd-kontroll növények esetében. Mindez arra utal, hogy a 10 és 33 μM Zr-ASC kezelés hatására kisebb mértékű oxidatív stresszhatás jelentkezik a növények levélszövetében, így az aktív oxigénformák méregtelenítésében kulcsfontosságú két enzim aktivitása is kevésbé emelkedik.

Az eredmények alapján arra következtethetünk, hogy a Zr, a 10 és 33 μM koncentráció-tartományban valamilyen módon mérsékelni képes a Cd által okozott oxidatív stresszhatást. A növekedési paraméterek, egyes esszenciális elemek akkumulációja, a klorofilltartalom szintén arra utalhat, hogy a 200 μM Cd által okozott jelentős mértékű abiotikus stresszhatás a 10 és 33 μM Zr-ASC adagolásával jelentős mértékben csökkenthető, illetve a növények stressztűrő képessége fokozható.

LEVÉLPERMETEZÉSI KÍSÉRLET

A levélpermetezési kísérlet során arra kerestünk választ, hogy a levélre juttatott Zr-ASC oldatot képes-e a növény felvenni, és megvalósul-e a Zr levél \rightarrow gyökér irányú transzportja. Eredményeink alapján megállapítható, hogy a levélre juttatott Zr-ASC oldatból, ha kis mértékben is, de a növény képes a Zr-ot akkumulálni, s ugyanakkor megvalósul a Zr levél \rightarrow gyökér irányú transzportja is. A Zr-ASC formájában kijuttatott 437,5 μg Zr-nak 2,7%-a akkumulálódik a gyökérben és 5,2%-a a levélben.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK)

Elsőként vizsgálva a cirkónium-aszkorbát búza csíranövényre gyakorolt hatását, megállapítottam, hogy:

- A 100 és 550 μM Zr-ASC kezelés jelentős mértékű abiotikus stresszhatást vált ki a búza csíranövény fejlődési paramétereire:
 - Szignifikánsan csökkenti a csírázási százalékot,
 - Szignifikánsan csökkenti a gyökér és a levél méretét
 - Szignifikáns növeli a gyökér és a levél szárazanyag-tartalmát
- A különböző Zr-koncentrációjú tápoldatból a búza csíranövény képes felvenni a cirkóniumot.
 - koncentrációjával A gyökérmintákban akkumulálódott Zr mennyisége összefüggést mutat a tápoldat Zr-
 - Kimutatható, hogy búzánövény esetében a cirkónium gyökérből a levélbe irányuló elemtranszport mellett kismértékben ugyan, de a levélből a gyökérbe is eljuthat, szintén elemtranszport útján.
 - Az 550 μM Zr-ASC kezelés esetében a transzlokáció már gátolt
- A különböző koncentrációjú Zr-ASC kezelések hatására megváltozik a növény gyökerében és levelében az aminosav-komponensek aránya, megnő az összaminosav-koncentráció értéke.
- A klorofilltartalom a Zr-ASC kezelés hatására szignifikánsan nő. Megállapítható, hogy a toxikusnak tekinthető 100 és 550 μM koncentrációtartományban a növények fotoszintetikus rendszere nem károsodik, klorotikus tünetek nem észlelhetők.
- 100 és 550 μM Zr-ASC kezelés oxidatív stresszreakciót vált ki, hatására szignifikánsan nő, a POD, az APX valamint a GR enzim aktivitása.
- A Zr-ASC kezelés képes ellensúlyozni a 200 μM kadmium növekedési paraméterekre gyakorolt toxikus hatását:
 - Szignifikánsan növeli a csírázási százalékot
 - Szignifikánsan növeli a gyökér és levél hosszát
 - Szignifikánsan csökkenti a gyökér és a levélminták szárazanyag-tartalmát
- A Zr nagymértékű tápoldat→gyökér transzlokációja. Zr és Cd közötti antagonista hatás miatt a búza csíranövény a toxikus kadmium hatására, feltételezhetően, hogy védekezési folyamatként, nagyobb mértékben dúsítja fel a cirkóniumot a gyökérben.

- A gyökérben akkumulálódott Zr-ASC részben át tudta venni a réznek és a cinknek a kadmium toxikus hatásával szemben betöltött védekező feladatát.
- A 10 és 33 μM Zr-ASC kezelés enyhíti a Cd okozta nagymértékű nehézfém-stressz káros következményeit:
 - Csökkenti a levél mangánkoncentrációjára és a gyökér vastartalmára kifejtett negatív hatását
 - A Zr jelenléte (33 μM) szignifikánsan növeli klorofill-koncentrációt
 - Csökkenti az összfenol-tartalmat, ami korlátozottabb mértékű stresszhatásra utal
 - Szignifikánsan csökkenti a POD- és az APX-aktivitást a gyökérben
 - Szignifikánsan csökkenti az APX és a GR enzim aktivitását a levélben.

JAVASLATOK

Tudományos munkám során, az egyes kísérleti eredmények alapján újabb és újabb kérdések merültek fel, amelyek egyben a kutatás folytatásának lehetőségét és irányvonalát is megszabják.

Az elkövetkező években a következő feladatokat szeretném elvégezni:

- A Zr-ASC komplex szerkezetének felderítése, a komplex molekula tulajdonságainak pontos leírása (stabilitási állandó, eltarthatóság stb)
- A Zr anyagmérlegének pontos feltérképezése a tápoldat \rightleftharpoons gyökér \rightleftharpoons levél anyagtranszport alapján, a transzfer faktorok vizsgálata
- A Zr és egyéb, elsősorban növényélettani szempontból esszenciális mikroelemek kapcsolatának mélyebb vizsgálata, anyagmérleg felállítása
- A Zr-ASC hatásának vizsgálata a dolgozatban leírt kadmiumon kívül más, a természetben megtalálható toxikus elemmel szemben (pl ólom, arzén, kromát stb). A leírt vizsgálatokat első lépésben búza csíranövényen szeretném végezni, hiszen a dolgozatban közölt mérési adataimmal ez hasonlítható össze.
- A leírt növényélettani vizsgálatok kiterjesztése más olyan növényekre (pl. bab, árpa, napraforgó), amelyekről a Ti-ASC-os kísérletek alapján már rendelkezünk összehasonlító mérési eredményekkel.
- Kertészeti haszonnövényeken végzett kísérleti eredményeink ismeretében szeretnénk vizsgálatainkat szélesebb körben kiterjeszteni. Célunk megvalósításához szeretnénk újra felvenni a kapcsolatot a SZIE, Állatorvos-tudományi Kar, Állattenyésztési, Takarmányozási és Laborállat-tudományi Intézetével, ahol évtizedek óta folynak mikroelem-kutatások a takarmányozástan területén.

KAPCSOLÓDÓ KÖZLEMÉNYEK

IF folyóiratcikk

- 1., Kosáry, J., Stefanovits-Bányai, É., Cseke, E., **Novák-Fodor, M.**, Boross, L.:
The effect of environmental pollution on the function of active skeleton muscle Part 1: An adequate method to study the effect of metal ions on the activity of phosphofructokinase
Pharmazie 1995 50, 489. **IF 0,740**
- 2., Simon, L., **M. Fodor**, I. Pais:
Effects of zirconium on the growth and photosynthetic pigment composition of *Chlorella pyrenoidosa* green algae.
Journal of Plant Nutrition. 2001. 24.(1), 159-174. **IF 0,593**
- 3., **Fodor, M.**, Hegóczky, J., Vereczkey, G.:
The effects of zirconium, a less known microelement, on basic fermentation characteristics and protein composition of *Saccharomyces cerevisiae*
Acta Alimentaria 2003. 32 (4) 353-362 **IF 0,284**
- 4., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Galiba, G., Stefanovits-Bányai, É.
Effect of zirconium on roots of wheat (*Triticum aestivum* L. MV 20) seedlings
Biologia (Section Botany) (in press) **IF 0,169**
- 5., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Stefanovits-Bányai, É.
Assessment of zirconium induced physiological alterations in wheat seedlings
Biologia Plantarum (in press)

Nemzetközi konferencia kiadvány (teljes)

- 1., **M. Novák - Fodor**, B. Janzsó, Á. Suhajda, I. Pais:
Preparation of zirconium-containing yeasts
Proc. 5. Int. Trace Element Symp., (Ed.: Pais, I.), Budapest, 1992. pp. 53-60.
- 2., L. Simon, **M. Novák-Fodor**, T. Papp, F. Hajdu, Á. Balogh, I. Pais:
The effect of zirconium on the *Chlorella pyrenoidosa* green algae
Proc. 5. Int. Trace Element Symp., (Ed.: Pais, I.), Budapest, 1992. pp. 61-74.
- 3., **M. Novák - Fodor**, B. Janzsó, Á. Suhajda, I. Pais:
Zirconium, als ein neues Spurenelement. Experimente mit Hefen
Mengen- und Spurenelemente, 12. Arbeitstagung (Ed.: Anke, M., Groppel, B., Gürtler, H., Grün, M., Lombeck, I., Schneider, H-J.). Friedrich-Schiller Universität Jena 1992 p. 275-281.
- 4., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Stefanovits-Bányai, É.
Examination of effect of zirconium ascorbate on wheat seedlings (*Triticum aestivum* L. Mv 20.)
10th Int. Trace Element Symposium, (Ed.: Pais, I.), ISBN 963 9256 95 1, Budapest, 2003. p.152-161

Magyar nyelvű konferencia kiadvány (teljes)

- 1., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Galiba, G., Stefanovits-Bányai, É.
Cirkónium komplex hatása a kadmium stressznek kitett búza (*Triticum aestivum* L. MV 20) csíranövényre
Proceedings of the 10th Symposium on analytical and environmental problems
(Ed.: Z.Galbács) ISBN 963 212 867 2, Szeged, 2003. p. 96-100
- 2., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Stefanovits-Bányai, É.
A Zr-aszkorbát hatása a bab (*Phaseolus vulgaris* L.) fejlődésére
SZAB, Intergrált kertészeti termesztés. (Ed.: Tné Hájos Mária) ISBN 963 210 350 5,
Szarvas, 2003. p. 97-101
- 3., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Stefanovits-Bányai, É., Galiba, G.
Cirkónium komplex hatása búza (*Triticum aestivum* L. MV 20) csíranövényre
Mikroelemek a táplálékláncban. Trace elements in the food chain. (Ed.: Simon L., Szilágyi M.) ISBN 963 9385 81 6, p. 99-106

Nemzetközi konferencia kiadvány (összefoglaló)

- 1., Janzsó, B., Suhajda, A., Hegóczky, J., Pais, I., **Fodor, M.**, Szabó, G., Máthé, R., Hamza, K., Szilbereky, J., Literáti, P.N., Radnai, Gy.
Production and application of microelement enriched yeast
Sixht European Congress on Biotechnology. ECB6 1993. Firenze, TH 225
- 2, Leskó, K., **Fodor, M.**, Hegedűs, A., Stefanovits-Bányai, É., Simon-Sarkadi, L.
Investigation of zirconium treated wheat seedlings by amino acid analyser
5th Balaton Symposion on high-performance separation methods, Siófok, 2003., P-166

EGYÉB PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

IF folyóiratcikk

- 1., **M. Fodor**, Cs. Novák, R. Rákosa, K. Tomor
Solid and liquid state investigation of the cyclodextrin complexes of mandelic acid cyclodextrin complexes
J. of Therm. Anal. 1997. 48., 515-525, **IF 0,598**
- 2., Cs. Novák, **M. Fodor**, G. Pokol, V. Izvekov, J. Sztatisz, M.J. Arias, J.M. Ginés
Investigation of cyclodextrin complexes of mandelic acid
J. of Therm. Anal. 1998. 51., 1039-1048 **IF 0,598**
- 3., **Fodor M.**
Szállóporok szilíciumtartalmának meghatározása spektrofotometriás eljárással
Magyar Kémiai Folyóirat 1999. 4. 138-145 IF 0.262

Nemzetközi konferencia kiadvány (teljes)

- 1., Cs. Novák, L. Szente, **M. Novák-Fodor**, Gy. Pokol, I. Ötvös:
Long term stability investigations of cyclodextrin-monoterpene complexes
Proc. of 14th Int. Pharm. Techn. Conf.
Apr. 4-6, 1995, Barcelona (Spain) vol 2a. 585-595
- 2., Cs. Novák, **M. Novák-Fodor**, Gy. Pokol, M.J.A. Blanco, J.M.G. Dorado, E. Tatár, A. Volford, I. Kolossváry, V. Izvekov:
Investigation of the Cyclodextrin Complexes of Mandelic Acid and Mandelic Acid Derivates
Proc. of 14th Int. Pharm. Techn. Conf.
Apr. 4-6, 1995, Barcelona (Spain) vol. 2. 25-41
- 3., **Fodor, M.**
Determination of silicon content in fly ash samples with spectrophotometric method
9th Int. Trace Element Symposium, (Ed.: Pais, I.), Budapest, 2001 p.152-161

Nemzetközi konferencia kiadvány (összefoglaló)

- 1., Novák, Cs., Pokol, G., Izvekov, V., Kolossváry, I., **Novák-Fodor, M.**, Arias, M.J., Gines, J.M.
Investigation of the mandelic acid benzyl ester – cyclodextrin complexes (Spectroscopic and thermoanalytical studies). ESTAC VI., Grado 1994
- 2., Novák, Cs., **Novák-Fodor, M.**, Pokol, G., Izvekov, V., Arias, M.J., Gines, J.M.
Solid and liquid phase investigation of mandelic acid – cyclodextrin complexes
ESTAC VI., Grado 1994.
- 3., Novák, Cs., Poppe, L., **Novák-Fodor, M.**, Pfundtner, P., Bukva, A.
Thermal investigation of cyclodextrin complexes of optically active citronellol derivatives
PhandTA 2. Genf, 1995 21PO
- 4., **Novák-Fodor, M.**, Novák, Cs., Rákosa, R., Tomor, K., Pokol, G., Gál, S.
Solid and liquid state investigation of the cyclodextrin complexes of mandelic acid and benzyl mandelate
PhandTA 2. Genf, 1995 22PO

- 5., **Fodor, M.**, Dernovics, M., Poppe, L.
Solid and liquid phase studies of the inclusion complexes of optically active terpenes
8th Int. Cyclodextrin Symp. Budapest, 1996. 2-p23
- 6., **Fodor, M.**, Novák, Cs., Blanco, M.J.A., Dorado, J.M.G., Szejtli, J.
Comprehensive studies cyclodextrin inclusion complexes
I. Magyar-Izraeli Termóanalitikai Konferencia, Ein-Bokek, 1996.
- 7., Novák, Cs., **Fodor, M.**, Blanco, M.J.A., Dorado, J.M.G., Muñoz, P., Gál, S.
Solid and liquid phase characterisation of inclusion complexes of mandelic acid and its mandelate CETA, Zakopane, 1997. S1/P11
- 8., Novák, Cs., **Fodor, M.**, Pokol, G., Gál, S., Liptay, G., Giordano, F.
Comparison the solid state stability of inclusion complexes prepared under different conditions PhandTa 3, Ascona, 21PO

Tankönyvek, jegyzetek:

- 1., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Általános és szervetlen kémia (kertészmérnök hallgatók részére)
KÉE, jegyzet, 1996. pp. 124. 1. kiadás
- 2., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Általános és szervetlen kémia (kertészmérnök hallgatók részére)
KÉE, jegyzet, 1996. pp. 126. 2. javított kiadás
- 3., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Kémiai számítási gyakorlatok
KÉE, jegyzet, Budapest, 1996. pp100.
- 4., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Válogatott fejezetek az általános és szerves kémiából
KÉE Kertészmérnöki Kar, Határon túli Tagozat, jegyzet, 1996. pp. 170.
1. kiadás
- 5., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Válogatott fejezetek az általános és szerves kémiából
KÉE Kertészmérnöki Kar, Határon túli Tagozat, jegyzet, 1998. pp. 170.
2. módosított kiadás
- 6., László Györgyné, Novákné **Fodor Marietta**
Élelmiszer-analítika I. (Élelmiszer-analitikus technikus szakképzés tankönyve)
Agrárszakoktatási Intézet, Budapest 1999. pp. 322., 1-7., 9., 10. fejezet (300 oldal)
- 7., László Györgyné, Novákné **Fodor Marietta**
Élelmiszer-analítika I. Gyakorlat (Élelmiszer-analitikus technikus szakképzés tankönyve)
Agrárszakoktatási Intézet, Budapest 1999. pp. 401., 1-6., 8., 9. fejezet (370 oldal)
- 8., **Novákné dr. Fodor Marietta**
Általános és szervetlen kémia (okleveles kertészmérnök hallgatók részére)
SzIE, jegyzet, 2000. pp. 246.