

Szent István Egyetem

Összefüggések a műtrágyázás, a potenciálisan
toxikus elemtartalom és az enzimaktivitás között
magyarországi talajokon

Szécsy Orsolya
Gödöllő
2016

A doktori iskola

megnevezése: Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Talajtan, agrokémia, környezeti kémia

vezetője: Csákiné Dr. Michéli Erika
egyetemi tanár
Szent István Egyetem
Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet
Talajtani és Agrokémiai Tanszék

Témavezető: Dr. Heltai György
egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem
Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet
Kémia Tanszék

Külső témavezető: Dr. Anton Attila (†)
tudományos főmunkatárs, a mezőgazdasági tudományok
kandidátusa
Magyar Tudományos Akadémia
Agrártudományi Kutatóközpont
Talajtani és Agrokémiai Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

A munka előzményei, a kitűzött célok

A mezőgazdasági talajokba kerülő ásványi műtrágyák nyomelemeket biztosítanak a termesztett növények számára, ezek azonban különböző szennyeződések, többek között nehézfémeket is tartalmazhatnak. Túlzott dózisé és ismétlődő műtrágya-használattal növekedhet a talajok összes nehézfém-tartalma (Gimeno-Garcia et al., 1996).

A talaj mikrobiótájának aktivitását és diverzitását a talajkörnyezetben bekövetkező változások közvetlenül befolyásolják. A mezőgazdasági gyakorlat az egyik legfontosabb tényező, ami jelentős változásokat okoz a talaj tulajdonságaiban és folyamataiban egyaránt. A mikroorganizmusok a változásokra gyorsan reagálnak, és hamar alkalmazkodnak a megváltozott környezeti feltételekhez. A mikrobiális populációkban és aktivitásukban bekövetkező változások, gyakran megelőzve a talaj fizikai és kémiai tulajdonságaikban kimutatható eltéréseket, a talajállapot korai figyelmeztető jelei lehetnek (Dick, 1994; Pankhurst és Lynch, 1995; Jangid et al., 2008).

Egyes nehézfémek kis mennyiségben serkentik a mikroorganizmusok szaporodását, mivel strukturális és funkcionális komponensei számos enzimnek és egyéb biológiailag aktív vegyületnek. Nagyobb mennyiségben azonban erősen káros hatással vannak a talaj természetes szabályozó rendszereire: befolyásolják a mikrobapopulációk átrendeződését és eloszlását, kedveznek a mikroorganizmusok toleráns formáinak, és hatásukra csökken a mikrobiális biomassza mennyisége (Brookes et al., 1986; Stephen et al., 1999; Kabata-Pendias és Pendias, 2001). Emellett ugyanaz az elem lehet bár hasznos, ill. esszenciális is, nagy koncentrációban mégis toxikus hatású (Simon, 1999; Kabata-Pendias, 2004). A nehézfémek és a talajmikrobióta kapcsolatáról készített legtöbb tanulmány laboratóriumi kísérletek között zajlott, míg sokan ipari szennyezések helyszínein tanulmányozták a nehézfémek talajmikrobiótára gyakorolt hatását (Ellis et al., 2002; Szili-Kovács et al., 2006; Li et al., 2009). A szabadföldi vizsgálatokat és a reprezentatív mintavételt nehezíti a mikroorganizmusok nagyfokú térbeli heterogenitása is (Vályi et al., 2013).

A dolgozat a TDR projekt (Az Országos Környezeti Információs Rendszer (OKIR) talajdegradációs alrendszerének (TDR) kialakítása) keretén belül valósult meg. A projekten belül a dolgozat elkészítéséhez a saját munkám az adatok gyűjtése, elemzése és értékelése, valamint az enzimaktivitás mérések elvégzése volt.

Célkitűzésem vizsgálni, hogy volt-e Magyarországon a műtrágya-használatból származó, kimutatható nehézfém-terhelés a célterületeken, tehát a különböző gazdálkodási gyakorlatok, jelen esetben a műtrágya-használat, és a talajok potenciálisan toxikus elemkoncentrációja között van-e kimutatható kapcsolat. Ezek alapján vizsgáltuk a Gazdálkodási Naplókából ismert, kijuttatott műtrágyák mennyisége és a talajminták nehézfém-tartalma közti összefüggéseket. Az alap talajparaméterek meghatározóak a fémek talajbeli viselkedése, valamint a mikrobiális folyamatok szempontjából, ezért az ezekkel megfigyelhető

összefüggéseket is vizsgáltuk (pH, CaCO₃, só, K_A, H%). Az aktuális talajállapot jellemzésére és a potenciálisan toxikus elemek hatásainak vizsgálatára mikrobiális aktivitás méréseket (fluoreszcein-diacetát és szacharáz enzimaktivitás, szubsztrát-indukált respiráció) végeztünk. Az országos felmérés, amin a munka alapul, reprezentatív mintavételt tartalmaz mind a talajtípus, mind a mezőgazdasági intenzitás szempontjából.

A dolgozatban a következő kérdésekre kerestem választ:

1. Mekkora a vizsgált szántóföldi talajok potenciális toxikus elemtartalma a hazai műtrágya-felhasználás mellett? Előfordult-e valamelyik vizsgálati parcellán olyan mértékű potenciálisan toxikus elem feldúsulás – feltételezhetően a műtrágyázásból eredően – aminek következtében statisztikai összefüggést lehet kimutatni a kijuttatott műtrágyák mennyisége és a talajok „összes” potenciálisan toxikus elem koncentrációja között?

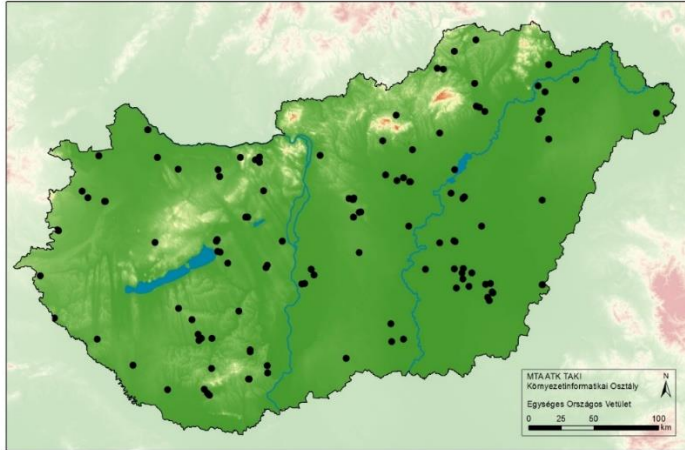
2. Mely vizsgált talajparaméterek határozzák meg leginkább a vizsgált talajokban a potenciálisan toxikus elemek koncentrációját?

3. Valós veszélyt jelent-e a hazai szántóföldi művelés alatt álló talajok potenciálisan toxikus elemtartalma a talajok mikrobiális aktivitására, a vizsgált három mikrobiális paraméter eredményei alapján? A vizsgált alap talajparaméterek közül melyek mutatják a legszorosabb összefüggést ezekkel a mikrobiológiai változókkal?

Anyag és módszer

Mintaterületek kiválasztása és jellemzése

A mintaterületek kiválasztása kétféle szempont alapján történt. Egyrészt kiválasztásra kerültek olyan mezőgazdasági üzemek, amelyek feltételezhetően (a megyei talajvédelmi szakemberek előzetes ismeretei alapján) országos szinten műtrágya, növényvédőszer és szerves trágya tekintetében a legnagyobb terheléssel dolgoznak, másrészt pedig olyanok, amelyek a gazdálkodást Magyarország jó minőségű termőhelyein (I. és II. termőhelyi kategória) folytatják, és ahol a talaj fizikai félesége vályog vagy vályog közeli. Fontos szempont volt, hogy a gazdálkodók előzetes információi alapján ismert legyen az adott mezőgazdasági táblákra kijuttatott N, P₂O₅ és K₂O műtrágya hatóanyag dózis. A mintaterületek minden esetben szántóföldi művelés alatt álló területek voltak. Országosan összesen 129 mintaterület került kiválasztásra. A mintaterületek elhelyezkedését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. A 129 mintaterület (RPR) megoszlása Magyarországon.

Mintavétel

A mintavételre országszerte 2011. augusztus 1. és november 30. között került sor. A mintavételi elrendezés szerint az adott tábla egy homogén foltján kijelölt, 5 hektáros Reprezentatív Parcella Részlet (RPR) átlói mentén 10-10, azaz összesen 20 pontmintából, a 0–30 cm-es rétegből készült az átlagminta.

Vizsgálatok

A talajminták „összes”, *potenciálisan toxikus elemtartalmának mérése* az MSZ 21470-50:2006 szabvány szerint történt, királyvizes kivonatból, az MTA ATK TAKI-ban és a Velencei Talajlaboratóriumban. A talajminták közel feléből desztillált vizes kivonat is készült, ám a legtöbb vizsgált elem esetében a mért koncentrációk nem érték el a kimutatási határértékeket, ezért ez a vizsgálat teljes egészében kimaradt a dolgozatból.

A *szűkített talajvizsgálathoz* a méréseket a következő szabványok szerint végezték el a Velencei Talajvédelmi Laboratóriumban:

- pH(H₂O): MSZ 21470-2:1981;
- Arany-féle kötöttségi szám: MSZ 08-0205:1978;
- humusz tartalom (m/m %): MSZ 21470-52:1983;
- vízdoldható összes só (m/m %): MSZ 21470-2:1981;
- CaCO₃ (m/m %): MSZ-08-0206-2:1978;

A dolgozatban szerepel továbbá az Arany-féle kötöttségi számból (K_A) számított fizikai féleség paraméter is (Stefanovits, 1992).

A mintákból az alábbi, széleskörűen elterjedt mikrobiológiai paramétereket határoztunk meg az MTA ATK TAKI-ban. Az egységes nedvességtartalom elérése érdekében légszáraz talajmintákkal dolgoztunk, amelyeket fizikai féleségük szerinti szabadföldi vízkapacitásra (pF 2,5)

nedvesítettünk újra. A nedves talajminták mérésére 10 napos, állandó hőmérsékletű előinkubáció után kerítettünk sort.

Az *FDA módszer* alapja az a folyamat, amely során a talajban található enzimek hidrolizálják a mintához adott szintelen fluoreszcein-diacetátot. A keletkező fluoreszcein már színes, és spektrofotométerrel mérhető. Az FDA hidrolízist Schnürer és Rosswall (1982) által kidolgozott, valamint Adam és Duncan (2001) által talajmintákra optimalizált módszerből kiindulva mértük. Mintánként három ismétléssel és egy kontrollal dolgoztunk. A méréshez Helios Beta Thermo Spectronic spektrofotométert használtunk. Az eredmények meghatározását kalibrációs görbe segítségével végeztük, és μg fluoreszcein/g talaj/óra mértékegységben adtuk meg.

A *szacharáz enzimaktivitás* meghatározásának alapja a szacharóz hidrolízisekor keletkező redukáló monoszacharidok kvantitatív mérése (Szili-Kovács, 2004). A mérést az MSZ-08-1721-2:1986 Magyar Szabvány szerint végeztük, három ismétlésben és 1 kontroll alkalmazásával mintánként. A minták színintenzitását Helios Beta Thermo Spectronic spektrofotométeren mértük 540 nm-es hullámhosszon. Az eredmények meghatározását kalibrációs görbe segítségével végeztük, és mg glükóz/g talaj/24 óra mértékegységben adtuk meg.

A *szubsztrát indukált respiráció (SIR)* egy olyan válaszreakción („respirációs válasz”) alapul, amelyet egy könnyen hasznosítható szubsztrát (jelen esetben glükóz) telítési koncentrációja mellett ad a mikrobiális biomassza (Szili-Kovács, 2004; Mirsal, 2008). Gázkromatográf (FISONS GC8000) segítségével mértük meg az egyes üvegedényekben keletkezett CO_2 mennyiségét. Az eredményeket $\mu\text{g CO}_2\text{-C/g talaj/óra}$ mértékegységben adtuk meg.

Gazdálkodói adatgyűjtésből származó műtrágya-adatok: a dolgozatban felhasznált műtrágya adatok gazdálkodói adatgyűjtésből származnak. A mintavételt megelőzően a gazdák kérdőíveken rögzítették, hogy a 2008/2009, 2009/2010 és 2010/2011 gazdálkodói években mennyi műtrágya-hatóanyagot (N, P_2O_5 , K_2O kg/ha külön) használtak a tábláikon. A három évet hatóanyagoként átlagoltam, és ezekkel az értékekkel dolgoztam tovább.

Alkalmazott statisztika: az adatok elemzése StatSoft Statistica program segítségével történt (12-es és 13-as verzió). A kiugró értékek a statisztikai elemzésekhez törlésre kerültek, mert erősen torzították az eredményeket. A lineáris összefüggések korrelációanalízis segítségével kerültek vizsgálatra, $p < 0,05$ valószínűségi szinten. A mintáink egymástól függetlenek, az adatok normalitásának vizsgálata Shapiro-Wilk teszt segítségével került elvégzésre. Ennek eredménye alapján nem minden paraméterről mondható el, hogy normális eloszlású, ezért a további elemzések nemparaméteres próbákkal történtek: Mann-Whitney U-teszt, Kruskal-Wallis teszt, majd post-hoc többszörös összehasonlításos utóteszt alkalmazásával, Bonferroni korrekcióval.

Eredmények és értékelésük

Összefüggések vizsgálata a hazai műtrágya-felhasználás és a szántóföldi talajok potenciálisan toxikus elemtartalma között

A mintaterületek potenciálisan toxikus elemtartalmával és a kijuttatott műtrágyák hatóanyagának mennyiségével elvégzett korrelációanalízis eredményei alapján a kijuttatott kálium mennyisége és a Co, Cr, Ni, Pb, Sn és Zn elemek között minden esetben laza, negatív korrelációt lehet megfigyelni. A nitrogén és foszfor tápelemek egyik potenciálisan toxikus elemmel sem mutatnak statisztikailag igazolható lineáris összefüggést. Ez azt jelenti, hogy a korrelációanalízis alapján nem lehet magasabb potenciálisan toxikus elemtartalmat kimutatni azokon a területeken, amelyek nagyobb dózisban kaptak N, P és K műtrágyát.

A mintaterületekre kijuttatott NPK műtrágyák együttes hatásának elemzéséhez a műtrágyák dóziséjától (N+P+K, kg/ha) függően 5 csoportot alakítottunk ki a mintákból (1. táblázat).

1. táblázat. A mintákhoz tartozó műtrágya-dózisokból képzett öt kategória és a hozzájuk tartozó dózis-tartományok. n a mintaszámot jelöli.

Műtrágyadózis-kategória	Dózis	n (db)
0	N+P+K = 0 kg/ha	17
1	0 kg/ha < N+P+K ≤ 100 kg/ha	33
2	100 kg/ha < N+P+K ≤ 200 kg/ha	47
3	200 kg/ha < N+P+K ≤ 300 kg/ha	28
4	300 kg/ha < N+P+K	4

Az öt csoport összehasonlítására végzett Kruskal-Wallis teszt alapján az As és Ba elemeken kívül az összes többi szignifikánsan összefügg ($p < 0,05$) a kijuttatott műtrágyák hatóanyagának mennyiségével. Ezután post-hoc többszörös összehasonlítással megvizsgáltuk, hogy az öt létrehozott műtrágyadózis-kategória közül melyek között van szignifikáns különbség.

Ezek alapján az As, Ba és Se kivételével a műtrágyát nem kapott területeken kisebb volt a potenciálisan toxikus elemek koncentrációja, mint azokon a területeken, amelyek N, P illetve K hatóanyagú műtrágyát kaptak. Ez azonban csak 100 kg/ha N+P+K hatóanyagig igaz, e dózis fölött nem ilyen egyértelműek az eredmények. Nem lehet olyan trendet megállapítani, ami azt igazolná, hogy a műtrágya-dózisok emelkedésével növekedne a potenciálisan toxikus elemek koncentrációja, elemenként azonban meglehetősen nagy különbségek figyelhetők meg.

Az 1-es kategória utáni csökkenő tendenciának több oka is lehet. Előfordulhat, hogy növények általi akkumuláció magasabb koncentrációnál indul

meg (Li et al., 2014), a talaj telítődhet, az adszorpciós és csapadékképződési folyamatok mellett a talajoldatba is több toxikus elem kerülhet, ami könnyebben kimosódik. Ha valóban (részben) a műtrágyázás okozza a fenti változásokat, akkor az is felmerülhet, hogy miután a növekvő műtrágya-dózisok hatására a talajok egyre jobban elsavanyodnak (Stefanovits et al., 1999; Iturri és Buschiazzo, 2016), a potenciálisan toxikus elemek nagy része mobilizálódik.

A 0-s és 1-es csoportok között majdnem minden elem esetében megfigyelhető növekedést az is okozhatja, hogy az intenzívebb műtrágyázással feltételezhetően a gazdálkodás egyéb tényezői, úgymint növényvédelem is intenzívebb lehet. A növényvédő szerek közvetítésével is meglehetősen sok potenciálisan toxikus elem jut a talajokba (Jepson, 2001). A kapott nagy interkvartilis terjedelmek kockázatot jelenthetnek, az adott talajoktól függően ugyanis szélsőségesen nagy különbségek alakulhatnak ki. Tovább nehezíti az egyértelmű hatások vizsgálatát, hogy nem ismerjük a talajok műtrágyázás előtti elemtartalmát. A vizsgált területek alapján feltételezhető, hogy a magyarországi talajok toxikus elem-koncentrációját elsősorban a geokémiai háttérértékek és a talajképző folyamatok helyi sajátosságai, valamint az egyéb talajtulajdonságok befolyásolják, nem pedig a mezőgazdálkodásból adódó terhelés.

A vizsgált hazai szántóföldi talajok potenciálisan toxikus elemtartalma és alap tulajdonságai közötti összefüggések értékelése

A dolgozatban vizsgált alap talajparaméterekkel végzett korrelációanalízis alapján a vizsgált potenciálisan toxikus elemek koncentrációját elsősorban a talaj humusztartalma, kötöttsége és sótartalma befolyásolja. A statisztikailag igazolható összefüggések mind pozitív előjelűek, tehát ezek a talajtulajdonságok a kapott eredmények alapján növelik a talajban a potenciálisan toxikus elemek koncentrációját. A humusztartalom a tizenkét vizsgált elemből tízzel korrelál, ezek közül az As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni és Zn elemekkel közepes erősségű korrelációban van. Két elem, a Mo és a Se esetében nem lehetett összefüggést kimutatni a humusztartalommal. A talajban ezek az elemek anionos formában vannak jelen. A talajok kötöttségével (Arany-féle kötöttségi szám) három elem nem mutatott szignifikáns kapcsolatot, ezek a Cd, a Mo és az Pb. A Cd kivételével a kötöttség ugyanazokkal az elemekkel van közepes erősségű korrelációban, mint a humusztartalom. A desztillált vizes pH az analízis alapján csak laza korrelációt mutat a kadmiummal és a rézzel. A karbonáttartalom és a vizsgált potenciálisan toxikus elemek közötti szignifikáns összefüggések minden esetben laza erősségűek és negatív előjelűek. Ezek az elemek a Co, Cr, Ni, Pb, Sn és Zn. Közepesnél erősebb korrelációt egyik paraméter-pár sem mutat.

A vizsgált mintákban a Cd, a Mo, az Pb és a Se eloszlása meglehetősen eltér a normálistól, továbbá a Cd, a Mo és a Se alacsony talajbeli koncentrációja következtében a mérés bizonytalansága is torzíthatja az eredményeket. Feltehető, hogy ezek az elemek ezért nem mutatnak összefüggést a kötöttséggel, illetve a humusztartalommal. Mivel az Pb a szakirodalom szerint a vizsgált elemek közül

a legerősebben kötődik a talajban, elképzelhető, hogy kötődése a szerves anyaghoz kis szervesanyag-tartalom mellett is erős, ezért nem változik.

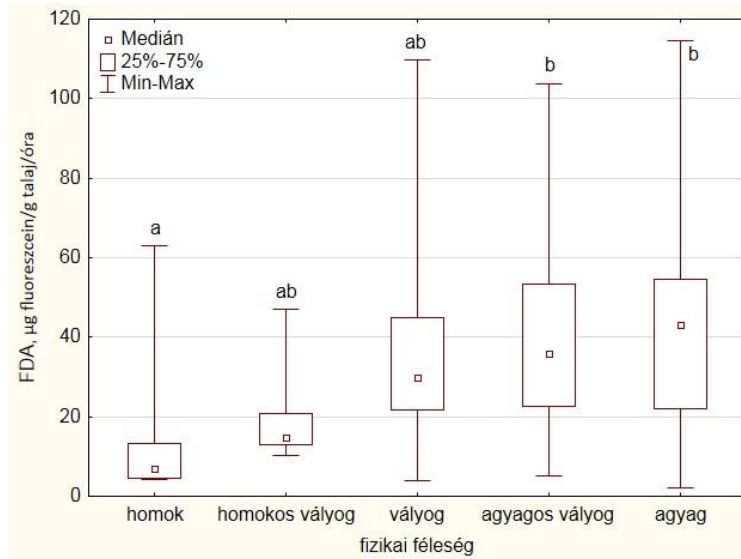
A fizikai féleséggel fennálló összefüggések vizsgálatát statisztikailag a műtrágya-dózisok hatásának vizsgálatával megegyezően végeztük el. A mintáink öt textúraosztályba sorolhatók: homok, homokos vályog, vályog, agyagos vályog és agyag. Kruskal-Wallis teszt alapján a Cd és a Mo kivételével az összes vizsgált elem koncentrációja összefüggésben van azzal, hogy milyen fizikai féleségű a talajminta. Az ezt követő post-hoc tesztek eredményei elemenként kissé eltérnek, de általában az agyagtartalom növekedésével egyre nagyobb a potenciálisan toxikus elemek koncentrációja. Az As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn esetében a homoktalajok elemkoncentrációja különbözik (kisebb) az agyagos vályog, az agyag, vagy mindkét fizikai féleségű talajok koncentrációjától. Ez a korreláció azért fontos, mert befolyásolhatja a vizsgált elemek mikrobiális aktivitására gyakorolt hatását.

A vizsgált hazai szántóföldi talajok mikrobiális aktivitása és alap tulajdonságai, valamint potenciálisan toxikus elemtartalma közötti összefüggések értékelése

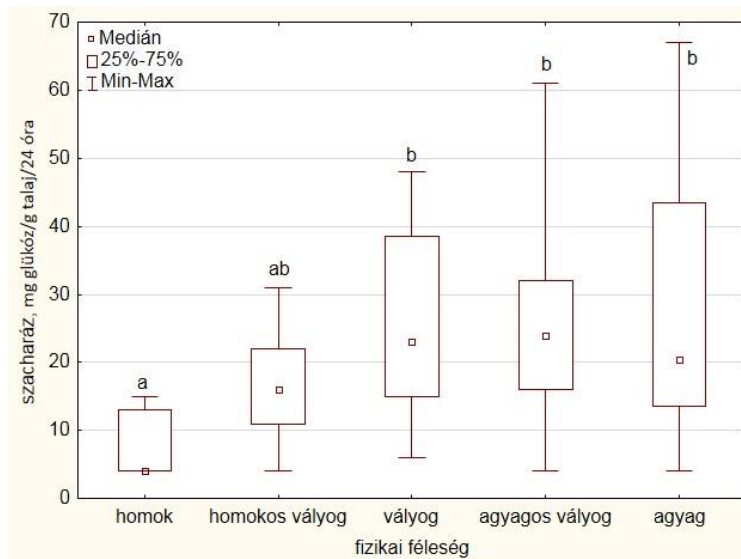
Lineáris korrelációanalízis alapján a három vizsgált paraméter között pozitív korreláció figyelhető meg: közepes a statisztikai összefüggés az FDA és a szacharáz aktivitások között (0,46***), valamint a szacharáz aktivitás és a SIR között (0,62***), míg laza a kimutatható kapcsolat az FDA aktivitás és a SIR között (0,34***). A mikrobiális biomasza mérete és a különböző enzimaktivitások (többek között az FDA) között szoros korrelációt tudott kimutatni Haynes (1999), valamint Stark és társai (2008) is.

A potenciálisan toxikus elemek és a mikrobiális aktivitás közti összefüggések keresése során, az egyéb változók okozta torzítás felderítése érdekében, az alap talajparaméterek és a mikrobiális paraméterek közötti összefüggéseket is megvizsgáltuk. Korrelációanalízis alapján az FDA aktivitás az összes vizsgált alap talajparaméterrel statisztikailag igazolható összefüggést mutat. A pH-val és a CaCO₃-tartalommal negatív ez a korreláció, a többi paraméterrel pozitív, és minden esetben laza erősségű. A szacharáz enzimaktivitás a humusztartalommal, a kötöttséggel és a sótartalommal pozitív, a karbonáttartalommal – az FDA aktivitáshoz hasonlóan – negatív kapcsolatban van. A korrelációk ez esetben is mind laza szintűek. A SIR a pH-val, a kötöttséggel és a sótartalommal laza szinten korrelál, a humusztartalommal pedig közepes szinten. Ezek a korrelációk pozitív előjelűek.

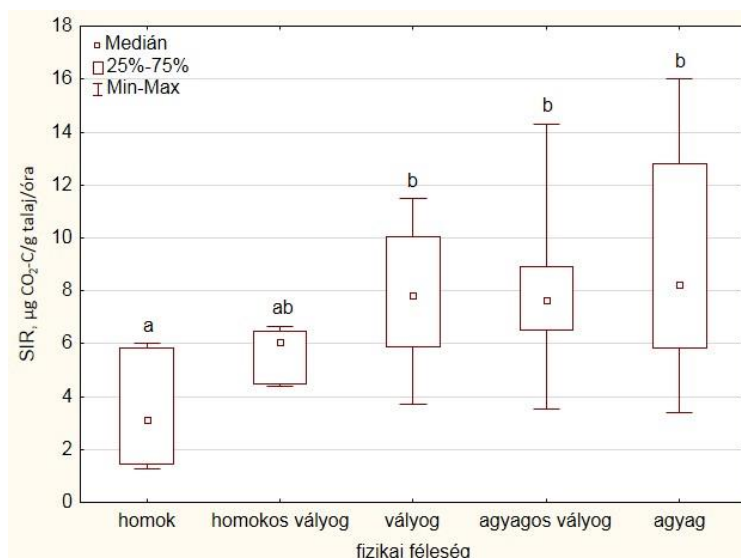
Kruskal-Wallis teszt alapján mindhárom mikrobiális mutató értékét szignifikánsan befolyásolja a talajok kötöttsége. A mikrobiális aktivitás az agyagtartalom növekedésével párhuzamosan nő. Az FDA aktivitás a homoktalajokon kisebb, mint az agyagos vályog és agyag talajokon (2. ábra). A szacharáz aktivitás és a SIR értéke egyaránt kimutathatóan kisebb a homoktalajokon, mint a vályog, agyagos vályog és agyag talajmintákban (3. és 4. ábra).



2. ábra. A fizikai féleség szerint csoportosított minták FDA aktivitása. Az a és b jelölések a post-hoc teszt alapján elkülöníthető csoportokra utalnak.



3. ábra. A fizikai féleség szerint csoportosított minták szacharáz aktivitása. Az a és b jelölések a post-hoc teszt alapján elkülöníthető csoportokra utalnak.



4. ábra. A fizikai féleség szerint csoportosított minták SIR értékei. Az a és b jelölések a post-hoc teszt alapján elkülöníthető csoportokra utalnak.

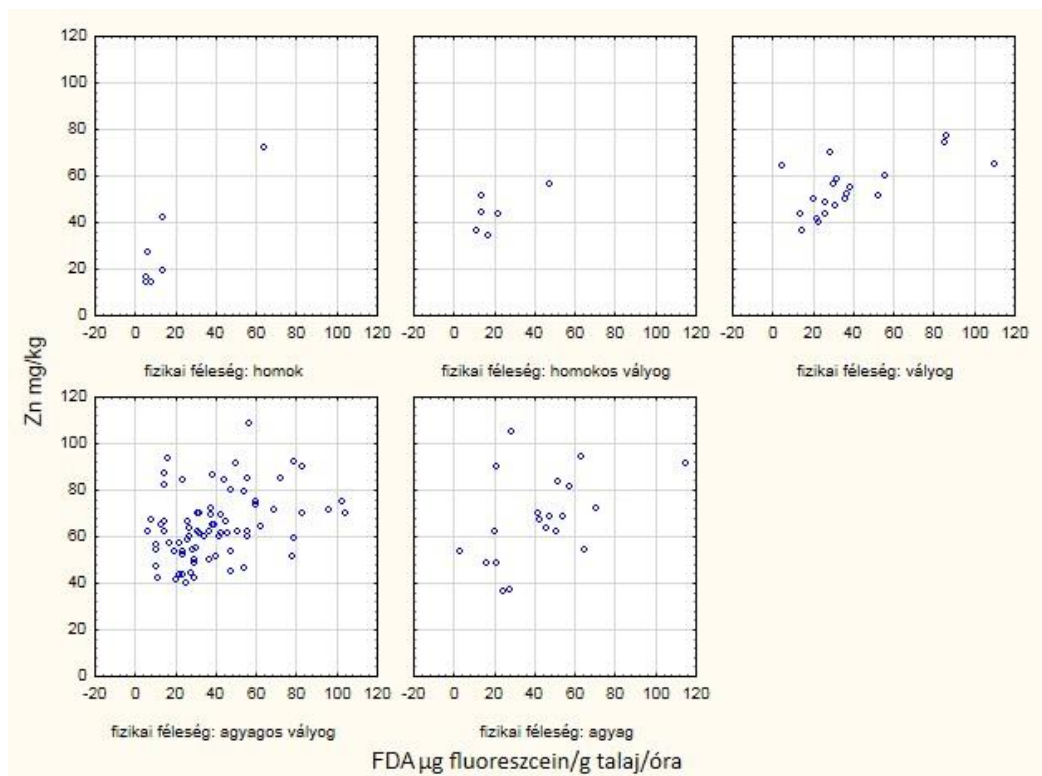
A szakirodalom alapján az FDA aktivitás, a szacharázaktivitás és a SIR egyaránt összefüggésben van a talajok agyagásvány-tartalmával, illetve humusztartalmával, ezek ugyanis kedvező feltételeket teremthetnek az enzimek akkumulálódásához (Schnürer és Rosswall, 1982; Brezovic skiné és Anton, 1985; Szili-Kovács et al., 2009). Mi több, egyes szerzők szorosabb összefüggést tudtak kimutatni a talaj fizikokémiai tulajdonságai és a mikrobiális biomassza között, mint a nehézfémek koncentrációja és a mikrobiális biomassza között (Zhang et al., 2016).

A pH és a CaCO_3 -tartalom megváltozására a gombák és a baktériumok eltérően reagálnak. Az FDA és a SIR egyaránt mindkettőt méri, ezért nem is lehet egyértelmű magyarázatot adni a kapott korrelációkra. A talajoldat magas sótartalma gátolhatja a mikrobák aktivitását (Füzy, 2007), az általunk vizsgált mintákban a sótartalom azonban feltehetően még nem érte el azt a szintet, ami már kimutathatóan csökkentené az aktivitást, emellett sótoleráns fajok elterjedése is nehezíti a változások nyomon követését.

A vizsgált potenciálisan toxikus elemek és a mikrobiális paraméterek között a statisztikailag igazolható összefüggések mind pozitív előjelűek. Az FDA aktivitás a Se kivételével az összes potenciálisan toxikus elemmel korrelál, ezek közül a Co, Cr, Ni, Pb, Sn és Zn esetében közepes, az As, Ba, Cd, Cu és Mo esetében laza erősségű az összefüggés. A szacharáz enzimaktivitás a Ba-mal közepes szintű, míg a Cr, Ni, Sn és Zn elemekkel laza kapcsolatban van. A SIR és a Ba között a szacharázhoz hasonlóan közepes erősségű az összefüggés, és laza korreláció mutatkozott a SIR és a Cr, Cu, Ni, Se, Sn és Zn között.

Savanyú, alacsony szervesanyag-tartalmú talajon végrehajtott nagy dózisú fém-só kezelés hatására 8 hetes talajinkubáció után Uzinger (2010) kísérletében a királyvíz-oldható Cr és az FDA, valamint a szacharáz enzimaktivitások között közepes, negatív korrelációt lehetett igazolni. Az Pb és Zn esetében azonban nem tudtak szignifikáns hatást kimutatni. A Zn esszenciális elemként valószínűleg hozzájárult a talajmikrobióta működéséhez, míg a krómkezelés jelentősen csökkentette a talaj pH-ját ($\text{pH} < 4,5$) (Szécsy et al., 2011).

A nehézfémek toxicitása általában az agyagtartalom növekedésével fordított arányosságban nő, azaz minél homokosabb a talaj, annál nagyobb a toxikus hatás (Doelman és Haanstra, 1986). Moreno és társai (2003), valamint Xian és társai (2015) szerint a szervesanyag-tartalom növekedésével csökken egyes nehézfémek toxicitása a mikrobákra nézve. Ezek fényében megvizsgáltuk, hogy a különböző fizikai féleségű talajokon eltér-e egymástól az elemek mikrobiális aktivitásra gyakorolt hatása. A fizikai féleségük szerint felosztott mintákból szemléltetésként a Zn – FDA diagramjai szerepelnek az alábbiakban (5. ábra).



5. ábra. A Zn koncentrációja és az FDA enzimaktivitás értékei a fizikai féleség szerint csoportosított talajmintákon.

A diagramokon látható, egyrészt, hogy a kötöttség növekedésével egyre nagyobb értékeket vesznek fel mind a vizsgált elemek koncentrációi, mind pedig a mikrobiológiai paraméterek, másrészt az elemek a homoktalajokon sem

mutatnak gátló hatást a mikrobiális aktivitásra, tehát homokon sem toxikusabbak, mint az agyagtalajokon. Ennek oka az eleve alacsony potenciálisan toxikus elem koncentráció is lehet.

Magyarországon hiányoznak a különböző talajok bevonásával végzett összehasonlító talajbiológiai vizsgálatok, és a korábbi kísérleteket is többnyire csak egy-egy talajon állították be. A nehézfémek talaj biológiai aktivitására gyakorolt hatásának meghatározása gyakran egymástól eltérő eredményeket hoz. Ez annak a következménye is lehet, hogy sokan túlságosan általános következtetéseket vonnak le az olyan rövidtávú laboratóriumi kísérletek eredményeiből, amelyeket egyetlen talajjal végeznek, ellenőrzött körülmények között (Vig et al., 2003; Szili-Kovács et al., 2009).

A potenciálisan toxikus elemek mikrobiótára gyakorolt hatását tanulmányozó publikációk általában eleve jelentősen szennyezett talajokkal, illetve mesterségesen terhelt talajmintákkal foglalkoznak. Ez utóbbi esetben is a terhelési koncentrációk közül a legalacsonyabb is magasabb, mint a természetes körülmények közötti, szennyezetlen talajok nehézfém koncentrációi (Yang et al., 2006; Khan et al., 2007; Wang et al., 2007; Gamalero et al., 2012; Jiang et al., 2015).

Az agyagtartalom feltehetően „elnyomja”, illetve a statisztikában elfedi a potenciálisan toxikus elemek esetleges gátló hatását. Chodak és társai (2013) szerint a nehézfémek mikrobiótára gyakorolt hatásainak vizsgálata a többi környezeti tényező zavaró hatása miatt nehézségekbe ütközik. Kiterjedt területek tanulmányozása esetén a talajtulajdonságok helyi sajátosságainak elemzése elengedhetetlen, ugyanis elfedhetik a nehézfémek esetleges hatásait.

A kapott eredmények arra utalnak, hogy a jelenlegi magyarországi szántóföldi gazdálkodás során, a nagy átlagot tekintve a talajban a potenciálisan toxikus elemek nem érik el azt a toxikus koncentrációt, ami gátlólag hatna a mikrobiális aktivitásra. Ez azonban nem jelenti azt, hogy szántóföldi gazdálkodás során ne juthatnának ki olyan koncentrációban nehézfémek, amelyek csökkenthetik a talajokban a mikrobiális aktivitást.

Új tudományos eredmények

1. A magyarországi, szántóföldi művelés alatt álló talajokban a vizsgált potenciálisan toxikus elemek királyvízben oldható összes koncentrációja nem mutatott statisztikailag igazolható összefüggést a jelenlegi hazai műtrágya felhasználás mértékével.

2. A talajtanból, illetve talajvédelemből ismert korreláció a potenciálisan toxikus elemek királyvízben oldható összes koncentrációja és a talajok kötöttsége, illetve humusztartalma között az általam vizsgált területeken, szántóföldi körülmények között is kimutatható. A korreláció mértéke elemenként eltérőnek bizonyult. A talajok kötöttségével és humusztartalmával egyaránt szignifikáns összefüggést mutattak az As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Sn és Zn elemek, a kettő közül csak a humusztartalommal a Cd és az Pb, míg csak a kötöttséggel a Se korrelált.

3. Az elvégzett FDA és szacharáz enzimaktivitás vizsgálat, valamint a SIR mérésének eredményei alapján a Magyarországra jellemző, jelenlegi műtrágya felhasználás melletti potenciálisan toxikus elem szintek még nem jelentenek veszélyt a talajok mikrobiális aktivitására. A vizsgált szántóföldi területeken statisztikailag is megerősíthető, hogy a mikrobiális aktivitás magasabb a nagyobb humusztartalmú, illetve a kötöttebb, nagyobb agyagtartalmú talajokon.

Következtetések és javaslatok

A kapott eredmények alapján a magyarországi, szántóföldi művelés alatt álló talajokban a potenciálisan toxikus elemek koncentrációja – többféle talajtípust figyelembe véve – a jelenlegi hazai műtrágya-felhasználás következtében nem mutatott statisztikailag igazolható növekedést. Az egyes elemek kémiai tulajdonságai azonban különbözőek, így helyileg kialakulhatnak kockázatot jelentő felhalmozódások.

Több elem esetében sikerült szignifikáns korrelációt kimutatni a toxikuselem-koncentráció és egyes talajparaméterek között, de ez feltehetőleg nem a műtrágya-kezelések hatására alakult ki, hanem egyéb változók is hozzájárultak, hiszen a minták többféle talajtípusról származnak. Tovább nehezíti az egyértelmű hatások vizsgálatát, hogy nem ismerjük a talajok műtrágyázás előtti elemtartalmát. A nehézfémek kötődése az agyag frakcióhoz régóta ismert, ez a korreláció azonban azért is fontos, mert befolyásolhatja a vizsgált elemek mikrobiótára gyakorolt hatását. A vizsgált területek alapján feltételezhető, hogy a magyarországi talajok toxikuselem-koncentrációját elsősorban a geokémiai háttérértékek és a talajképző folyamatok helyi sajátosságai, valamint az egyéb talajtulajdonságok befolyásolják, nem pedig a mezőgazdálkodásból adódó terhelés.

A potenciálisan toxikus elemek és mikrobiális aktivitás mutatók közötti korrelációk mind pozitív előjelűek voltak, tehát a vizsgált elemek nem csökkentették a mikrobiális aktivitást. A szántóföldi területek elemzése alapján a Magyarországra jellemző, jelenlegi műtrágya felhasználás melletti potenciálisan toxikus elem szintek még nem hatnak gátlólag a talajok mikrobiális aktivitására. Az eredmények szerint a kötöttség növekedésével a mikrobiológiai paraméterek is nagyobb értékeket vettek fel. A minták fizikai féleség szerinti csoportosítása után kiderült, hogy az elemek a homoktalajokon sem mutattak gátló hatást a mikrobiális aktivitásra, tehát a szakirodalommal ellentétben a homokon sem voltak toxikusabbak, mint az agyagtalajokon. Ez a tény, valamint a toxikus elemek és a mikrobiális mutatók közötti pozitív korreláció magyarázata feltehetően az eleve alacsony potenciálisan toxikus elem koncentráció lehet.

A vizsgált talajminták szántóföldi gazdálkodásból származnak. Az eredmények értelmezését ez esetben nehezíti a túl sok nem kontrollált változó, szemben egy beállított kísérlettel, ugyanakkor ez közelebb áll a valóságos helyzethez. A sokféle talaj egyrészről előny a reprezentativitás miatt, de ez okozza a nehézséget is a hatások vizsgálata során, a korrelációk ugyanis nem feltétlenül

hatásokat jeleznek. A talajok tulajdonságai, elsősorban a humusztartalom és az agyagtartalom az esetleges hatásokat elfedhetik.

A hazai szántóföldi talajokban a potenciálisan toxikus elemek magas koncentrációja jellemzően geológiai, ill. ipari, bányászati eredetű. A szántóterületekre műtrágyával kijuttatott szennyezések monitorozása hazánkban hiányzik. A talajmonitorozó rendszerek fenntartása, talajbiológiai paramétereinek monitorozása a műtrágyázásból eredő potenciális szennyezések miatt is kiemelt jelentőségű. Ehhez fontos lenne a műtrágyákból eredő potenciális szennyezések hosszútávú monitorozása is, a talajparaméterek vizsgálatával összhangban. Ajánlott, hogy fokozott figyelem kísérje a kedvezőtlen termőhelyi adottságú talajokat (pl. homoktalaj, savanyú talaj) a műtrágyák alkalmazása során. A dolgozatban felmerült vizsgálati problémák miatt érdemes lenne azonos típusú kontroll talajokkal, hosszabb távon végezni hasonló méréseket. Mivel a toxikus elemek hatásait a mikrobiális aktivitásra többnyire nagydózisú kísérletekben vizsgálják, ezek mellett szükség lenne természetes, szennyezetlen körülmények közötti, alacsonyabb fémkoncentrációk hatásainak vizsgálatára is.

Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Tudományos folyóiratokban megjelent (közlésre elfogadott), lektorált, teljes szövegű tudományos közlemény

1.1. Idegen nyelvű, impakt faktoros folyóiratban (WEB OF SCIENCE szerint):

1.1.1. Hazai kiadású cikk

RÉKÁSI M., UZINGER N., ANTON Á.D., SZÉCSY O., FÜLÖP T., ANTON A. (2014): A blend of bioash and gypsum utilized for agro-environmental purposes in a soil incubation experiment. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), p. 205–218. (IF(2013): 0,456)

1.1.2. Külföldi kiadású cikk

SZÉKÁCS A., MÖRTL M., FEKETE G., FEJES Á., DARVAS B., DOMBOS M., SZÉCSY O., ANTON A. (2014): Monitoring and biological evaluation of surface water and soil micropollutants in Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(3), p. 47–60. (IF(2013): 0,727)
konferencia cikk

VÁLYI K, SZÉCSY O, DOMBOS M, ANTON A. (2013): Sampling Design Optimization on Arable Lands for Integrated Soil Monitoring for Sustainable Production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1-4), p. 178–194. (IF(2012): 0,420)

1.2. Idegen nyelvű, nem impakt faktoros folyóiratban

1.2.1. Hazai kiadású

SZÉCSY O, UZINGER N, VILLÁNYI I, SZILI-KOVÁCS T, ANTON A. (2011): Összefüggések a króm, az ólom és a cink különböző kioldási frakciói, illetve egyes talajmikrobiológiai és -biokémiai mutatók között lignittel kezelt nyírségi homoktalajon. *Agrokémia és Talajtan*, 60(2), p. 383–396.

VÁLYI K, SZÉCSY O, DOMBOS M, ANTON A. (2011): Komplex talajmonitorozás mintavétel-optimalizációja. *Talajvédelem (Különszám) Talajaink a változó természeti és társadalmi hatások között*. Budapest: Talajvédelmi Alapítvány, p. 285–291.

3. Lektorált könyv/jegyzet (részlet) (nyomtatott formában v. elektronikus adathordozón), népszerűsítő könyv

3.2. Könyvírás, magyar nyelvű

DOMBOS M, SZÉCSY O, SZABÓ J, ANTON A. (2009): Mintavételi kérdések a komplex talajszennyezési és talajbiológiai monitorozás tervezésénél. p. 18–32. In: SZÉKÁCS A. és ILLÉS Z. (Szerk.): *MONTABIO-füzetek I. Környezetanalitikai és toxikológiai indikációkon alapuló rendszer a fenntartható talajminőségért*. Budapest: MTA Növényvédelmi Kutatóintézet, 62 p. ISBN 978-963-87178-4-9 (I.)

VÁLYI K, SZÉCSY O, DOMBOS M, ANTON A. (2010): Komplex talajmonitorozás mintavétel-optimalizációja. p. 7–13. In: SZÉKÁCS A. (Szerk.): *MONTABIO-füzetek IV. Komplex monitoring rendszer összeállítása talajmikroszennyezők analitikai kimutatására és biológiai értékelésére a fenntartható környezetért*. Budapest: MTA Növényvédelmi Kutatóintézet, 66 p. ISBN 978-963-87178-7-0 (IV.).

4. Kongresszusi kiadványokban megjelent közlemények (nyomtatott formában v. elektronikus adathordozón – kizárólag az ISBN, ISSN vagy más, hitelesített kiadványaira vonatkozóan)

4.3. Megtartott előadás vagy bemutatott poszter alapján készített egy oldalas idegen vagy magyar nyelvű összefoglaló, szerkesztett tudományos folyóiratban, vagy annak különszámában

SZÉCSY O, HORVÁTH M, HELTAI GY, ANTON A. (2011): Risk evaluation of red mud contamination by fractionation of element content with BCR sequential extraction procedure. In: *XIV Hungarian-Italian Symposium on Spectrochemistry - 54. Spektrokémiai Vándorgyűlés (2011) (Sümege)*. Abstract Book (ISBN 978-963-9970-22-9), p. 42.

5. Kongresszusi kiadványokban megjelent közlemények (nyomtatott formában v. elektronikus adathordozón – nem hitelesített kiadványokra vonatkozóan)

5.3. Egy oldalas idegen vagy magyar nyelvű összefoglaló

DOMBOS M, SZÉCSY O, VÁLYI K, LÁSZLÓ P, ANTON A. (2010): Komplex talajmonitorozás mintavétel-optimalizációja. In: Talajtani Vándorgyűlés (2010) (Szeged). Absztrakt kötet, p. 27.

UZINGER N, VILLÁNYI I, SZÉCSY O, ANTON A. (2011): Effects of some heavy metals on invertase enzyme and total microbial activity in soil pot experiments. In: The Fourth International Conference Enzymes in the Environment: Activity, Ecology and Applications (2011) (Bad Nauheim, Németország). Abstract Book, p. 103.

VÁLYI K, SZÉCSY O, DOMBOS M, ANTON A. (2011): Sampling Design Optimization on Arable Lands for Integrated Soil Monitoring for Sustainable Production. In: 12th International Symposium on Soil and Plant Analysis (2011) (Chania, Kréta, Görögország). Abstract Book, p. 43.

TÓTH E., GELYBÓ GY., HOREL Á., KÁSA I., SZÉCSY O., BIRKÁS M., FARKAS CS. (2014): A talajbolygatás rövid távú hatása a talaj szén-dioxid kibocsátására a talajművelés példáján. In: Talajtani Vándorgyűlés (2014) (Keszthely). Absztrakt kötet, p. 157.

Felhasznált irodalom

- ADAM, G., DUNCAN, H. (2001): Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, pp. 943–951.
- BREZOVICKSKINÉ A.M., ANTON A. (1985): Különböző magyarországi talajok szacharázaktivitásának összehasonlító vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan*, 34, pp. 64–79.
- BROOKES, P.C., HEIJNEN, C.E., MCGRATH, S.P., VANCE, E.D. (1986): Soil microbial biomass estimates in soils contaminated with metals. *Soil Biology and Biochemistry*, 18, pp. 383–388.
- CHODAK, M., GOŁĘBIEWSKI, M., MORAWSKA-PŁOSKONKA, J., KUDUK, K., NIKLIŃSKA, M. (2013): Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals. *Applied Soil Ecology*, 64, pp. 7–14.
- DICK, R.P. (1994): Soil Enzyme Activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.W., D.C. COLEMAN, D.C., BEZDICEK D.F., STEWART, B.A. (szerk.): Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin*, pp. 107–125.

- DOELMAN, P., HAANSTRA, L. (1986): Short- and long-term effects of heavy metals on urease activity in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2(4), pp. 213–218.
- ELLIS, R.J., BEST, J.G., FRY, J.C., MORGAN, P., NEISH, B., TRETT, M.W., WEIGHTMAN, A.J. (2002): similarity of microbial and meiofaunal community analyses for mapping ecological effects of heavy-metal contamination in soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 20, pp. 113–122.
- FÜZY, A. (2007): Néhány sziki növény és a rizoszféra mikroorganizmusok közötti interakciók. PhD dolgozat. Gödöllő.
- GAMALERO, E., CESARO, P., CICATELLI, A., TODESCHINI, V., MUSSO, C., CASTIGLIONE, S., FABIANI, A., LINGU, G. (2012): Poplar clones of different sizes, grown on a heavy metal polluted site, are associated with microbial populations of varying composition. *Science of The Total Environment*, 425, pp. 262–270.
- GIMENO-GARCIA, E., ANDREU, V., BOLUDA, R. (1996): Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environmental Pollution*, 92, pp. 19–25.
- HAYNES, R.J. (1999): Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. *Biology and Fertility of Soils*, 30, pp. 210–216.
- ITURRI, L.A., BUSCHIAZZO, D.E. (2016): Light acidification in N-fertilized loess soils along a climosequence affected chemical and mineralogical properties in the short-term. *Catena*, 139, pp. 92–98.
- JANGID, K., WILLIAMS, M.A., FRANZLUEBBERS, A.J., SANDERLIN, J.S., REEVES, J.H., JENKINS, M.B., ENDALE, D.M., COLEMAN, D.C., WHITMAN, W.B. (2008): Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, pp. 2843–2853.
- JEPSON, P.C. (2001): Pesticides, uses and effects of. In: LEVI, S.A. (szerk.): *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*. Amsterdam: Elsevier, pp. 692–702.
- JIANG, Y., DENG, H., SUNB, D., ZHONG, W. (2015): Electrical signals generated by soil microorganisms in microbial fuel cells respond linearly to soil Cd²⁺ pollution. *Geoderma*, 255–256, pp. 35–41.
- KABATA-PENDIAS, A. (2004): Soil-plant transfer of trace elements – an environmental issue, *Geoderma*, 122, pp. 143–149.
- KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H. (2001): *Trace Elements in Soils and Plants (3rd ed.)*, CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 37–92.
- KHAN, S., CAO, Q., HESHAM, A., XIA, Y., HE, J. (2007): Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb. *Journal of Environmental Sciences*, 19(7), pp. 834–840.
- LI, L., WU, H., GESTEL, C.A.M., PEIJNENBURG, W.J.G.M, ALLEN, H.E. (2014): Soil acidification increases metal extractability and bioavailability in old orchard soils of Northeast Jiaodong Peninsula in China. *Environmental Pollution*, 188, pp. 144–152.

- LI, Y.T., ROULAND, C., BENEDETTI, M., LI, F., PANDO, A., LAVELLE, P., DAI, J. (2009): Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (5), pp. 969–977.
- MIRSAL, I.A. (2008): Soil Pollution. Origin, Monitoring & Remediation. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag. 312 p.
- MORENO, J.L., GARCIA, C., HERNANDEZ, T. (2003): Toxic effect of cadmium and nickel on soil enzymes and the influence of adding sewage sludge. *European Journal of Soil Science*, 54, pp. 377–386.
- MSZ 08-0205:1978
- MSZ 21470-2:1981
- MSZ 21470-50:2006
- MSZ 21470-52:1983
- MSZ-08-0206-2:1978
- MSZ-08-1721-2:1986
- PANKHURST, C.E., LYNCH, J.M. (1995): 12 The role of soil microbiology in sustainable intensive agriculture. *Advances in Plant Pathology*, 11, pp. 229–247.
- SCHNÜRER, J., ROSSWALL, T. (1982): Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, 43, pp. 1256–1261.
- SIMON L. (1999): A talaj szennyeződése szerves anyagokkal. pp. 3–32. In: SIMON L. (Szerk.): Talajszennyeződés, talajtisztítás. Környezetügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató KGMT-5. Budapest: Környezetgazdálkodási Intézet, 219 p.
- STARK, C.H., CONDRON, L.M., O'CALLAGHAN, M., STEWART, A., DI, H.J. (2008): Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, pp. 1352–1363.
- STEFANOVITS P. (1992): Talajtan. Budapest: Mezőgazda Kiadó, 379 p.
- STEFANOVITS P., FILEP GY., FÜLEKY GY. (1999): Talajtan. Budapest: Mezőgazda Kiadó. 4. kiadás, 470 p.
- STEPHEN, J.R., CHANG, Y.J., MACNAUGHTON, S.J., KOWALCHUK, G.A., LEUNG, K.T., FLEMMING, C.A., WHITE, D.C. (1999): Effect of toxic metals on indigenous soil β -subgroup proteobacterium ammonia oxidizer community structure and protection against toxicity by inoculated metal-resistant bacteria. *Applied Environmental Microbiology*, 65(1) pp. 95–101.
- SZÉCSY O., UZINGER N., VILLÁNYI I., SZILI-KOVÁCS T., ANTON A. (2011): Összefüggések a Cr, Pb és Zn kioldási frakciói és talajmikrobiológiai mutatók között. *Agrokémia és Talajtan*, 60(2), pp. 383–396.
- SZILI-KOVÁCS T. (2004): Szubsztrát indukált respiráció a talajban. Szemle. *Agrokémia és Talajtan*, 53, pp. 198–214.

- SZILI-KOVÁCS T., MÁTHÉ-GÁSPÁR G., MÁTHÉ P., ANTON A. (2006): Microbial Biomass and Phosphomonoesterase Activity of the Willow (*Salix* sp.) Rhizosphere in a Heavy Metal Polluted Soil. *Agrokémia és Talajtan*, 55(1), pp. 241–250.
- SZILI-KOVÁCS T., ZSUPOSNÉ OLÁH Á., KÁTAI J., VILLÁNYI I., TAKÁCS T. (2009): Talajbiológiai és talajkémiai változók közötti összefüggések néhány tartamkísérlet talajában. *Agrokémia és Talajtan*, 58(2), pp. 309–324.
- UZINGER N. (2010): Nehézfém immobilizációs modellkísérletek lignittel. Doktori (Ph.D.) értekezés. Keszthely. 155 p.
- VÁLYI K., SZÉCSY O., DOMBOS M., ANTON A. (2013): Sampling Design Optimization on Arable Lands for Integrated Soil Monitoring for Sustainable Production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44, pp. 178–194.
- VIG, K., MEGHARAJ, M., SETHUNATHAN, N., NAIDU, R. (2003): Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. *Advances in Environmental Research*, 8, pp. 121–135.
- WANG, Y., SHI, J., LIN, Q., CHEN, X., CHEN, Y. (2007): Heavy metal availability and impact on activity of soil microorganisms along a Cu/Zn contamination gradient. *Journal of Environmental Sciences*, 19(7), pp. 848–853.
- XIAN, Y., WANG, M., CHEN, W. (2015): Quantitative assessment on soil enzyme activities of heavy metal contaminated soils with various soil properties. *Chemosphere*, 139, pp. 604–608.
- YANG, Z., LIU, S., ZHENG, D., FENG, S. (2006): Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. *Journal of Environmental Sciences*, 18(6), pp. 1135–1141.
- ZHANG, C., NIEA, S., LIANGA, J., ZENGA, G., WUA, H., HUAA, S., LIUA, J., YUANA, Y., XIAOA, H., DENGGA, L., XIANGA, H. (2016): Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure. *Science of The Total Environment*, 557–558, pp. 785–790.