

3. A szennyezőanyag sorsa a talajban

Gruiz Katalin

3.1. Szerves szennyezőanyagok sorsa a talajban

A szerves szennyezőanyagok nagy része a talajban a holt szerves anyagokhoz hasonlóan viselkedik, ezért kötődésükre, terjedésükre, sorsukra, hatásaikra az alábbiak jellemzőek:

1. Előfordulhatnak gáz- vagy gőzformában, vízben oldott vagy emulgeált formában és szilárd formában. A gáz és gőzformájú szennyezőanyag lehet a talajgázban, lehet a talajvízben oldva vagy a szilárd felülethez kötődve, szorpcióval.
A folyékony halmazállapotú szennyezőanyagok is előfordulhatnak gőzformában vagy a talajnedvességben illetve a talajvízben oldva, folyadékfilm formájában, a szilárd fázishoz kötődve, vagy különálló fázisként, a talajvíz felületén.
A szilárd fázisú szennyezőanyag szemcseméretétől és fizikai-kémiai tulajdonságaitól függően lehet a talajszemcsékhez keveredve vagy a talaj szilárd szemcséinek felületéhez kötve szorpcióval vagy a mátrixba kötődve különféle erőkkel, akár kovalens kötésekkel is, például a humuszba épülve.
A talajszemcsék felületén tehát gázok, gőzök, folyadékok és szilárd szennyezőanyagok egyaránt megkötődhetnek.
2. A szerves szennyezőanyagok a talajban mineralizálódhatnak, belőlük energia termelődik, C, N és P tartalmuk pedig ismét felhasználhatóvá válik.
3. Kommetabolizmussal olyan xenobiotikumok bomlanak, amelyeket a talajmikroorganizmusok enzimrendszerei úgy bontanak el, hogy közben nem termelnek belőle energiát.
4. A perzisztens szennyezőanyagok nem bomlanak egyáltalán, vagy csak részlegesen bomlanak le.
5. Egyes szerves szennyezőanyagok vagy metabolitjaik beépülnek a biomasszába, a talajmikroorganizmusok sejtjeibe vagy a növények szöveteibe.
6. Beépülhetnek a táphumuszba, ahonnan bizonyos feltételek között könnyen mobilizálódhatnak.
7. Beépülhetnek a szerkezeti humuszba, ahonnan csak kis valószínűséggel mobilizálódhatnak.
8. Fossilizálódhatnak, ezzel véglegesen kikerülhetnek az anyagkörforgalomból.
9. Szerves szennyezőanyagok természetes koncentrációcsökkenése során az alábbi *kémiai folyamatok* ismeretesek:
 - Hidrolízis során a szerves anyag reakcióba lép a vízzel és alkohol képződik.
 - Szubsztitúció során nukleofil ágenssel (anionnal) lép reakcióba a szerves anyag.
 - Elimináció során a szerves vegyület funkciós csoportjai leszakadnak, majd kettős kötés alakul ki.
 - Oxidáció/redukció során elektron transzport valósul meg a reakcióban résztvevő komponensek között.
10. Biodegradálható szerves szennyezőanyagok természetes koncentráció-csökkenése során a mikrobiológiai folyamatok kerülnek előtérbe.

- A mikroorganizmusok degradáló képessége és hatékonysága függ a vegyi anyag szerkezetétől, összetételétől, illetve a hozzáférhetőségétől.
- A jelenlévő mikrobaközösség minősége nagyban befolyásolja a degradáció hatékonyságát. Az adott szennyezőanyag biológiailag csak akkor támadható meg, ha az evolúció során már kialakult a bontására képes enzimmapparat. Egyes szennyezőanyagok bontásához gyakran nem szükségesek különleges enzimek, mások viszont speciális enzimszisztemek jelenlétét feltételezik. Gyakran a talajban kis arányban előforduló fajok feldúsulása elegendő a szennyezőanyag szubsztrátként való hasznosulásához, más esetekben specifikus gén, vagy génekombináció szükséges.
- A szerves vegyületnek fizikailag, kémiailag diszpergálnak kell lennie vízben azért, hogy a mikrobák számára hozzáférhetőek legyenek. Ezt, a mikrobák által szintetizált detergens hatású vegyületek, az ún. biotenzidek biztosítják.
- Számos környezeti tényező van hatással a bontás intenzitására, például a hőmérséklet, a tápanyagok, a pH, és a redoxviszonyok.
- Az oxigén mennyisége és forrása (levegő, NO₃, SO₄, stb.) meghatározza a légzésformákat. A telítetlen talajban a talajlevegő szolgáltatja a légzéshez szüksége oxigént, a vízzel telített talajban a nitrátlégzés vagy a szulfátlégzés dominál. A vas is szolgálhat elektronakceptoroként.
- A szerves szennyezőanyagok természetes koncentráció-csökkenése során szabad vagy oldott oxigénből 3-4 mg szükséges 1 mg telített szénhidrogén teljes oxidációjához, vagyis a teljes mennyiség CO₂-dá és vízzé alakításához. A szénhidrogének degradációja az oxidáción alapul, oxigén bevitelével a molekulába az első lépés, melyet az oxigenáz enzimek végeznek aerob körülmények között. A mikroorganizmusok oxigénhez férhetőségét meghatározza a talaj típusa, a talajvízzel való telítettsége, s az egyéb szubsztrátok jelenléte.
- Szénhidrogének hatására, azok bontása közben a gyorsan aktivizálódó mikroorganizmusok viszonylag rövid idő alatt felélik a mozgósítható foszfor- és nitrogén tápelemekészletet, s ezzel összefüggésben a degradáció mértéke is csökken. E limitáció elkerülése érdekében ammónium-, foszfátsókat, karbamid-foszfátot, N-P-K műtrágyát adagolhatunk a szennyezett talajhoz.
- A hőmérséklet azon túl, hogy a mikrobiális bontás mértékét meghatározza, befolyással van a szennyező szénhidrogén fizikai állapotára, összetételére. Talajban folyó biodegradációhoz szükséges hőmérséklet optimuma 20-30 °C, de létezik lebontás igen szélsőséges körülmények között is. Alacsony hőmérséklet esetén megnő az olaj viszkozitása, vízdoldhatósága csökken az illékony frakciók párolgása. A hőmérséklet emelkedésével nemcsak a szennyezőanyag mobilitása növekszik meg, de a mikroorganizmusok aktivitása is nő.
- A talajok pH-ja széles határok között változhat, de a szerves szennyezőanyagok biodegradációja szempontjából a legkedvezőbb a semleges érték körüli pH.

3.2. A szerves szennyezőanyagok sorsa a talajban

A szerves szennyezőanyagok sorsa a növényi tápsók ionjainak sorsával analóg a talajban, ezért kötődésükre, mobilizálódásukra, biológiai felvételükre az alábbiak jellemzőek:

1. Előfordulhatnak atomrácsba, molekularácsba épülve, oxidok és hidroxidok alapjában, ionos formában vagy komplexben.
2. Az atomrácsba (molekularácsba) épült fémforma általában korpuszkuláris szennyezőanyagokban vagy még el nem mállott kőzetekben (mint szennyezőanyagban) fordul elő, leggyakrabban a Si, a Fe vagy az Al, esetleg a Ca, Mg vagy a K helyettesítőiként. Innen a mállás során szabadulnak fel, kerülnek ionos formába, és mosódnak be (pl. mélyebb rétegekbe) vagy ki (pl. más környezeti elembe).
3. Az oxidokban és hidroxidokban a Fe és az Al helyettesítőiként fordulnak elő és kőzetek mállásakor, a talaj savanyodásakor mobilizálódnak.
4. Az ionos fémforma lehet a talajvízben vagy a talajnedvességben oldva, vagy a talajkolloidok (agyagásványok, humusz) felületére ionosan kötve, az ionerősségtől függő mértékben kicserélhető formában, innen veszik fel a növények és/vagy a talajlakó egyéb organizmusok.
5. A szerves fémkomplexek a talajban főleg a humuszanyagokhoz kötve fordulnak elő, mobilisak.
6. A fenti fémformák közül az ionos és komplex kötésben lévők mozgékonyak, vízoldhatóak, kicserélhetőek, biológiailag felvehetőek. Az oxidok és hidroxidokban kötött fémek közepesen, a molekula és atomrácsban lévők nehezen hozzáférhetőek.
7. Az egyes fémformák egymásba átalakulhatnak, a külső körülményektől függ a fém megoszlása az egyes kémiai formák között. Az egyensúlyok illetve az egyensúlyok eltolódása is a környezeti paraméterektől függ. Az egyes fémformák közötti egyensúlyt elsősorban a pH, a redoxpotenciál, a nedvességtartalom, a talaj típusa, ásványi összetétele és szemcseméreteloszlása határozza meg. A fémek nagymértékben hatnak egymásra is, tehát az egyensúlyi koncentrációk függenek a többi fém jelenlététől.
8. Az egyes fémformák elsősorban a pH, a redoxpotenciál és a nedvességtartalom függvényében megoszlanak a talaj egyes fázisai között. A megoszlásokat előkészítő alapfolyamatok a kőzetek mállása és a fémek oldódási illetve kicsapódási folyamatai (pl. a CO₂-vel, illetve annak oldott formájával lejátszódó reakciók).
9. A szilárd formák kialakulásában fontos szerepe van az adszorpciónak és a kemisorpciónak, melyek agyagásványok, vas-, mangán-hidroxidok, szervesanyagok felületén következnek be. Ezen felületek nehézfém megkötő képessége különböző, és a következői sorrendben csökken:

mangán-oxid > huminsav > vas-hidroxid > agyagásvány.

A nehézfémek megkötődését vizsgálva különböző agyagásványokban a pH függvényében azt tapasztalták, hogy a Cd²⁺ pl. szilárd állapotban való megjelenése pH = 8,0 alatti tartományban függ az agyagásvány minőségétől, míg pH = 9,0–11,0 tartományban agyagásványtól független.
10. Az akkumulációval együtt járó rezisztencia mechanizmusa lehet:
 - a sejtfal komponenseihez való kötődés bioszorpcióval
 - extracelluláris komplexképzés (pl. a *Rhizobium sp.* extracelluláris poliszaccharidok segítségével tudja semlegesíteni a toxikus fémeket,
 - intracelluláris megkötés,
 - plazmidfüggő akkumuláció (pl. a *Ralstonia metallidurans* CH34 baktérium két féle plazmidot tartalmaz, melyek a nehézfém rezisztenciáért felelősek.

A pMOL30, 240 kb plazmid a Cd, Co, Zn, Hg, Tl, Cu, és Pb, míg a pMOL28, 165 kb plazmid a Co, Zn, Ni, Hg, Tl és Cr rezisztenciáért felelős.

- periplazmás peptidoglikánhoz kötés.

11. A toxikus fém a táplálékláncba elsősorban a növényeken keresztül kerül. A talaj összes fémtartalmának csak egy kis része hozzáférhető a növények számára. Elsősorban a vízoldható és a könnyen kicserélhető forma az, amit a növények képesek felvenni. Így tehát, ha megnő a talajoldat fémtartalma, akkor fémtűrő és fémakkumuláló fajok terjednek el a szennyezett területen. Az adaptációs mechanizmus lehet:
 - a rhizoszférában csapja ki, így sem a gyökérben, sem pedig a szárban nem mérhető nagy fém koncentráció (pl. *Epilobium sp.*)
 - a gyökérben raktározza, nem szállítja el a szárba (pl. *Elytrigia repens*, *Poa annula*, *Scirpus holoschenus*)
 - csak a szárban és a levelekben raktározza el (pl. *Inula viscosa*, *Euphorbia dendroides*, *Arundo dorax*)
 - a vakuolumokban immobilizálja
 - a sejtfalban immobilizálja
 - mind a gyökérben, mind a szárban raktározza a fémeket az anyagcseréjéből kiiktatva (pl. *Cistus salviifolius*, *Helichrysum italicus*).
12. Tovább bonyolítja a helyzetet a talajban, hogy gyakorlatilag sosincs egyensúly, részben mert egyes folyamatok egyensúlyának beállításához évekre sőt évtizedekre van szükség, részint mert állandóan változnak a klimatikus, az éghajlati és a szűkebb környezeti paraméterek.