

Illatjelek a mélyben

VUTS JÓZSEF – TÓTH MIKLÓS

Közismert, hogy a szaglás milyen fontos szerepet tölt be életünkben. Nélküle nem éreznénk az ételek ízét vagy a virágok illatát, és olyan speciális adottságokat igénylő foglalkozások, mint például a borkóstolás, nem létezhetnének. De nemcsak mi, emberek vesszük hasznát eme érzéknek, hanem a körülöttünk lévő élővilág minden tagja is. A szaglás folyamata általában úgy jelenik meg előttünk, hogy illatmolekulák úsznak a levegőben s jutnak el orrüregünk szaglóhámjára, ahol ingerületet váltanak ki, s az agyi feldolgozás után kialakul az illatérzet. Azonban a szaganyagokat nemcsak a szél, hanem a folyó is sodorhatja: a vízi élőlények ugyanúgy képesek szaglásra, mint a szárazföldiek.

Viszont belegondoltunk-e már abba, hogy vajon a lábunk alatt, a talajban lehetséges-e a szaglás? Az örök sötétség birodalmában a látás értelmét veszti, s az a kép alakulhat ki bennünk, hogy az élőlények többsége „vakon” kószál a sűrű közegben. A tapintásnak biztosan fontos szerep jut a föld alatti tájékozódásban, s a vibrációs jelekkel történő információközlés is előtérbe kerül. De mindezek az érzékek valószínűleg nem elég specifikusak ahhoz, hogy például egy gyökérrágó rovarlárva „tudtára adják”, merre van a tápnövénye. A lárva ugyanis nem engedheti meg magának, hogy próba-szerencse alapon haladjon értékes métereket ott, ahol az előrejutás minden bizonnyal nagyon energiaigényes (a legtöbb talajlakó gerinctelen egy nagyjából 1 m²-es alapterületű szelvényt barangol be az élete során). Ugyanakkor a táplálékforrás elhelyezkedéséről a növény gyökérrendszere által kibocsátott illatanyagok, mint kémiai jelek (szemiokemikáliák), elég nagy pontossággal tájékoztathatják a rovarok talajlakó lárvaikat.

A föld alatti világ kémiai ökológiája – a föld felettivel összehasonlítva – egy még csak részben feltárt tudományterület. Ez többek között annak tudható be, hogy az illatmolekulák begyűjtése, a biológiailag aktívak kimutatása, valamint a különböző viselkedéscsoportok sokkal nehezebben kivitelezhetők egyrészt a nagy kémiai „háttérzaj”, másrészt a még nem kellően kidolgozott módszertan miatt. E cikkben hiányos tudásunk töredékeit szedjük össze, és egy, a gyakorlatban működő példát is bemutatunk.



Májusi cserebogár pajorja közelről. A piros nyilak a legfőbb szaglószerveket, a csápokat jelölik (Forrás: <http://llanurascastellanas.blogspot.co.uk>)

A talaj mint háromfázisú rendszer

A talaj szilárd, folyadék- és gázfázisban lévő anyagok keveréke. A szilárd fázisú ásványi és szerves anyagok a talaj térfogatának nagyjából felét teszik ki, a kitöltetlen rész pedig a pórustér, amelyben folyadékfázisú és gázfázisú anyagok fordulnak elő. A talajvizet alapvetően háromféle erő mozgatja a víztelítettségtől függően. Telített talajokban, ahol a víz kitölti az összes pórust, a gravitációnak van nagy szerepe, míg telítetlen talajokban előtérbe kerül a kapillárishatás. Ahogy a talaj víztartalma tovább csökken, a növények légzéséből származó „húzóhatás”, illetve a gyökérsejtekben oldott sók által kifejtett ozmózishatás révén kerül a víz a gyökerekbe.

A folyékony vizet nem tartalmazó pórusokban vízgőz és különböző gázok keverékei találhatóak, melyek együttesen a talajlevegőt alkotják, s mely fő alkotóelemei a nitrogén, oxigén és szén-dioxid. A nitrogén és oxigén aránya hasonló a légköri le-

vegőéhez, de szén-dioxidból 5–10-szer nagyobb mennyiség van jelen a mikrobiális, növényi és állati légzés jóvoltából. Mivel nincs légmozgás, a gázok diffúzióval haladnak a nagyobb koncentrációjú hely felől a kisebb koncentrációjú felé a talajpórusok között. Jellemző a diffúzió sebességére, hogy a gázok gyorsabban diffundálnak keresztül 1 m vastag légrétegen, mint egy 1 mm-es vízhártyán, ami a pórusok felületét borítja. De légcseré ugyanúgy történik a talajlevegő és a légköri levegő között is. Jellemzően az oxigén a légkörből a talajba, míg a szén-dioxid fordított irányban diffundál. Oxigénhiányos talajokban az anaerob lebontás során nitrogénvegyületekből nitrogéngáz, nitrogén-monoxid és nitrogén-dioxid, míg szerves vegyületekből metán keletkezhet, melyek végül a légkörbe jutnak.

Ebből is látható, hogy a talajlevegő összetétele sokszínű és dinamikusan változó, melyet több tényező (hőmérséklet, nedvességtartalom, kémhatás stb.) együtt-

tesen befolyásol. Ehhez a sokszínűséghez járulnak hozzá azok az illékony, a növényi másodlagos anyagcseréből származó vegyületek, melyeket a gyökerek választanak ki.

A növényi illatanyagok anyagcseréjéről röviden

A növényi anyagcseretermékeknek többféle csoportosítása létezik, melyek közül mi most – az egyszerűség kedvéért – azt választjuk, mely elsődleges és másodlagos anyagokra oszlik. Eszerint elsődleges (primér) anyagok a cukrok, fehérjék és zsírok, amelyek közvetlenül részt vesznek a növény növekedésében és fejlődésében. Másodlagosak (szekunder) a ritkább, különlegesebb, kisebb mennyiségben képződő molekulák, melyek feladataikat a növény életében közvetett módon fejtik ki, például a szabályozásban (hormonok) vagy az élettelen és élő környezettel történő kölcsönhatások során (méreganyagok, színezékek, illóolajok stb.). Témánk szempontjából a másodlagos anyagcseretermékek a fontosak, hiszen ezek között találunk olyan illékony vegyületeket, melyek információhordozó tulajdonságuk talajlakó gerinctelenek számára, míg az elsődleges anyagcseretermékek többnyire nem illékony molekulák, így a szaglásban sincs jelentős szerepük.

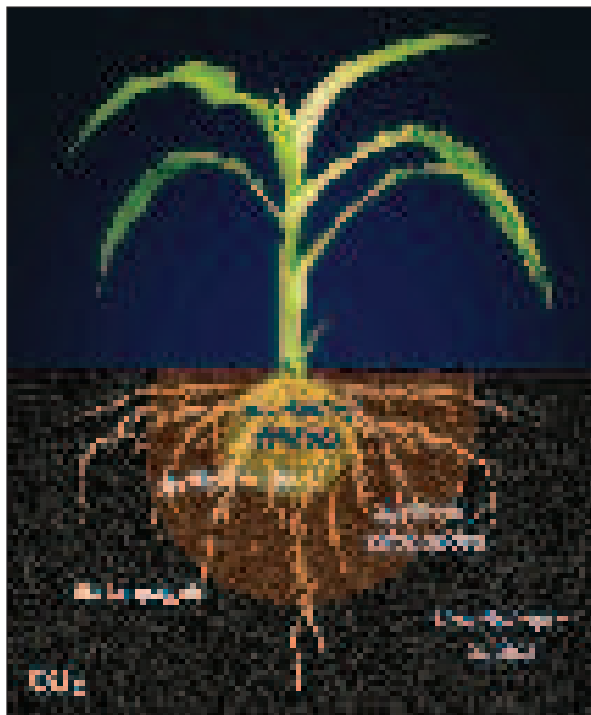
Az elsődleges anyagcsere során képződő molekulákat a növényi sejt különböző anyagcsereutak (malon- és mevalonsav-út, sikimissav- és oxilipin-út stb.) folyamán alakítja át illékony másodlagos anyagcseretermékeké, melyek a gyökérsejteket elhagyva a talaj légüreibe jutnak, és diffúzió útján szétterjednek. Definíció szerint ezek a vegyületek olyan zsirolékony folyadékok, melyek gőznyomása magas. A növényi illatanyagok többsége négy fő csoportból kerül ki a bioszintézis-útjukat figyelembe véve: terpenoidok, zsírsavszármazékok, aromás vegyületek és aminosav-származékok. Maguk a szintézis-reakciók a sejt plazma, a zöld színtestek, a mitokondriumok, a peroxiszómák és az endoplazmatikus retikulum között megosztva zajlanak, s a sejt vagy olajtestekben, a sejt nedvüregében (vakuólum) és különböző membránokba burkolva tárolja a molekulákat, vagy sejten kívüli mirigyekben. Az, hogy ezek a többségükben hidrofób vegyületek hogyan mozognak a sejt plazma vizes közegében, máig sem teljesen tisztázott. Egyes feltételezések szerint ahhoz, hogy az illatanyagok koncentrációja elérjen egy bizonyos értéket a sejten kívüli térben, a máig uralkodó modell alapján, miszerint passzív diffúzió mozgatja az illat-

molekulákat, ezeknek olyan magas koncentrációt kellene elérniük a sejtben, ami annak mérgezéséhez vezetne. Ezért újabban úgy gondolják, hogy a zsirolékony illatanyagok a sejtben hidrofób struktúrákba beleoldódva jutnak el a sejtmembránhoz és a sejt falhoz, ahol szállítófehérjék segítségével végül átkerülnek a növény felszínét borító viaszrétegbe, majd onnan – mindezidáig ismeretlen folyamatok révén – a külvilágba.

A talajlakó rovarlárva szaglőrendszere

Mezőgazdasági jelentőségük ellenére eddig kevés kutatás célozta meg a föld alatt élő rovarlárva szaglásának felderítését. Egy korábbi Természet Világa számban (145. évf. 7. füzet 307–310) már bemutatott a rovarok elsődleges szaglőszerveinek, a csápnak a felépítését és működését. A legtöbb ilyen irányú leírás a „föld fölötti” térben élő utolsó életstádiumú rovarokról ké-

sebbek, mint a föld felettié, ami logikus, ha belegondolunk abba, hogy egy him selyemlepke-bonyolultságú fejfüggelék nem lenne praktikus a talajszemcsék és szűk pórusok közötti haladásakor. A talajlakó lárva szaglőrendszerének első részletes funkcionális anatómiai leírásai egészen 2012-ig vártattak magukra, melyek a májusi és az erdei cserebogár pajorjait vették górcső alá (1. ábra). Megálapították, hogy a májusi cserebogár-pajorok képesek a különböző növényi illatanyagok megkülönböztetésére a csáponok és az állkapcsi tapogatókon egészen a királis molekulák enantiomerjeinek a pontosságáig. A kutatók az egyes érzékszőrök szintjén vizsgálták a szaglás érzékenységet elektroantennográfiás (EAG) technikákat használva. A másik tanulmány az erdei cserebogár agyi szaglőstruktúráinak a felépítését nézte, amiből kiderült, hogy például a szaglőlebeny, ami a perifériás szaglőszervekből kifutó axonok első agyi átkapcsolási helye, nagyjából 70 glomerulusból áll, ami a föld felett élő rovarok szaglőrendszerének bonyolultságával – így fejlettségével – vetekszik.



Talajlakó rovarlárva, amint tápnövényre talál a szemiokemikáliák segítségével (feltételezett mechanizmus). A gyökérzóna bal felén a különböző illékony vegyületek hatótávolságát érzékeltetjük, a jobb felén – dőlt betűvel – az e vegyületek által meghatározott viselkedést jelezzük. Skálát azért nem adunk meg, mert ez növényegyedtől függően változhat

szült, valamint például az ecetmuslica lárva-stádiumairól. Korábról is ismertek azonban már olyan anatómiai munkák, melyekből kitűnik, hogy általában a talajlakó izeltlábúak csápjai jóval egyszerűbb felépítésűek és ki-

Talajlakó izeltlábúak és a gyökerek illatanyagai

Jó pár olyan tanulmány ismert, amely rovarok viselkedési választát vizsgálta növények föld alatti részéből származó illatanyagokra, de e kutatások száma messze eltörpül a föld fölött élő rovarokkal végzett kutatások száma mellett (2. ábra). A legkorábbi ismert kísérleteket drótférgelkkel, pattanóbogarak (*Agriotes* spp., Col.: Elateridae) lárvaival végezték még a múlt század húszas és negyvenes éveiben, melyek több szerves savhoz és aminosavhoz vonzódtak laboratóriumi viselkedéstudományokban. Ezeket követték a sárgarépalégy (*Psila rosae*) és viráglegyek (*Delia* spp.) (Dipt.: Psilidae és Anthomyiidae) lárvaival végzett vizsgálatok. A kutatók itt a hasznos növények föld alatti részeiből gyűjtötték illatmintákat, az összetevőket azonosították, majd e vegyületek szintetikus mintáit viselkedéstudományokban kipróbálták a lárvaikon, melyek közül számos vonzó hatású volt.

A sárgarépalégy esetében szénhidrogének, ketonok és egy észter voltak aktívak, míg a *Delia*-fajoknál a hagymalégy lárvái több kéntartalmú szerves vegyületre, a káposztalégyé pedig főként izotiocianátokra – a káposztafélék jellegzetes vegyületeire – adtak pozitív választ. Legújabbban az előbb

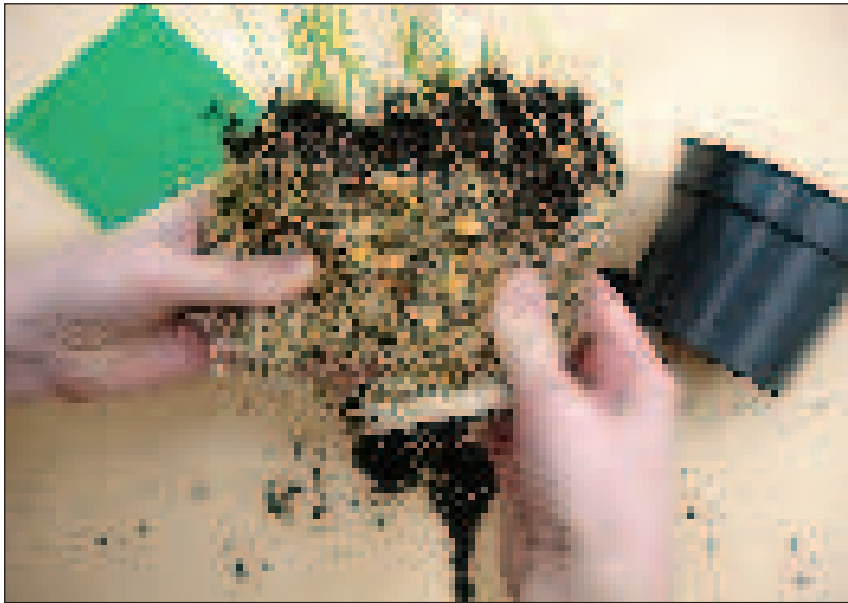
A kukoricabogár lárvái képesek a szén-dioxid koncentrációjában beállt nagyon kis változások észlelésére, mely lehetővé teszi számukra, hogy hatékonyan kövessék a szagjelet. Már 0,125% légtéri koncentráció is képes pozitív viselkedési választ (csalogatást) kiváltani, viszont 10%-nál

gadását eredményezhetik és beindíthatják a táplálkozást. Ilyenek a különböző cukrok és egyes zsírsavak (linol- vagy olajsav). Érdekes módon a kukoricabogár lárváinak táplálkozása (*E*)- β -kariofillén kibocsátását eredményezi a kukoricagyökerekből, ami nemcsak újabb lárvákat, hanem egyik természetes ellenségüket, a *Heterorhabditis megidis* (Nematoda: Heterorhabditidae) fonálféregfajt is odavonzza, melyek nagy hatékonysággal pusztítják a bogárlárvákat.

Végül megemlítjük, hogy egyes rovarfajok föld fölött élő imágói is használnak kémiai jeleket annak érdekében, hogy föld alatt elhelyezkedő táplálékforrásokra leljenek. Például a *Hylastes nigrinus* (Col.: Scolytidae) és a *Hylobius abietis* (Col.: Curculionidae) egyedeit különböző terpének elegye irányítja fenyő tápnövényeik gyökereihez, míg a *Hylastinus obscurus* (Col.: Scolytidae) fajt a vöröshere gyökerei által kibocsátott aldehidek és észterek ösztönzik ásásra és vezetik táplálékforrásokhoz.

Csapda drótféreg fogására

Világszerte sok cég forgalmaz feromonokkal és növényi illatanyagokkal működő csapdákat kártevő rovarok fogására, rajzásmenetük követésére. Ezek azonban kivétel nélkül mind föld fölött élő fejlődési alakokat céloznak meg, ami közvetetten mutatja, hogy a föld alatti világ kémiai ökológiájának kutatása még gyerekcipőben jár. Kísérletek már történetek méreganyaggal töltött illatkapszulák kifejlesztésére, melyek a kukoricabogár lárváit csalogatják, majd megmérgezik, illetve olyan génmódosított kukoricafajták kifejlesztésére, melyek sok, hagyományosan természetett fajtával ellentétben hatékonyan csalogatják a bogárlárvát megtámadó fonálférget illatjelek kibocsátásával. Azonban legjobb tudomásunk szerint ezen újítások még nincsenek kereskedelmi forgalomban. Az MTA Növényvédelmi Intézetének Alkalmazott Kémiai Ökológiai Osztálya viszont kifejlesztett egy olyan csapdát, amely a földbe süllyesztve hatékonyan fogja az európai kártevő drótféregfajokat (**3. ábra**). A CSALOMON® csapdacsalád eme új tagja jó becslést ad a helyi drótféregnépesség nagyságáról, és használatával elkerülhető az igencsak munkaigényes kézi talajminta-vételezés. A szántóföldi növénytermesztéssel foglalkozók számára a pattanóbogarakat fogó feromoncsapdák – melyek képesek megállítani küszöbérték-fogások alapján akár egy évre előre is, hogy van-e kártételi veszély – a drótféregcsapdákkal együtt egészen pontos előrejelzést adnak a várható károsítás mértékéről.



Csapdázott drótféreg keresése a drótféregcsapdában

említett drótféreg kémiai kommunikációjának újabb részleteire derült fény, amikor gyökerek által kibocsátott további illatanyagok csalogató hatását bizonyították.

Talán a kémiai ökológia szempontjából a legteljeskörűbb vizsgálatokat a kukoricabogár (*Diabrotica v. virgifera*) (Col.: Chrysomelidae) lárváival végezték. Az ok egyszerű: ez a faj az Egyesült Államok kukoricatermesztésének legfontosabb kártevője, ami ma már Európában is újabb területeket hódít meg a '90-es években történt betelepülése óta. A legnagyobb kárt föld alatt élő lárvái okozzák, melyek a kukorica gyökereit fogyasztják. A tojásokból kikelő apró lárvákra nehéz feladat hárul: rá kell találniuk a tápnövényre 1 napon belül, különben elpusztulnak. De hogyan csinálják? Nos, a folyamat három fő lépésből áll. Elsőként a gyökerek által kibocsátott szén-dioxidhoz vonzódnak, amely a növényi légzésből származó anyagcseremelléktermék. Ez a talaj légpórusai között könnyen diffundál és koncentrációgrádienseket alakít ki, melyek a tápnövényüket kereső kukoricabogár-lárváknak jelzik a gyökerekhez vezető nagyjából utat. (A szén-dioxidhoz való vonzódást több egyéb talajlakó rovarlárva esetében is kimutatták, mely mutatja e vegyületnek a növényevők föld alatti táplálékforrásainak felderítésében játszott általános szerepét.)

magasabb értékek elkerülést okoznak, ami a szén-dioxid mérgező hatása miatt következik be. Egy kísérletben az első stádiumú lárvák 80%-a képes volt 6 órán belül a tápnövényre rátalálni 13 cm-ről, ahol a szén-dioxid koncentrációja 0,10% volt, míg a gyökerek közvetlen közelében 0,13%, ami egy 4 napos csíranövény kibocsátásának felel meg. Más kísérletek azonban kimutatták, hogy szén-dioxidgradiens hiánya esetében – ami akkor következhet be, ha például túl sok a lebomló szerves anyag a talajban, így az telítette válik szén-dioxiddal – a lárvák ugyanúgy képesek tápnövényükre találni. Jelenleg úgy gondolják, hogy a kereső viselkedés e második fázisában, a gyökerek közelében, a kukoricánövény másodlagos anyagcseréjéből származó vegyületek kapnak szerepet, melyek közül számos illékony. Ilyenek a 6-metoxi-2-benzoxazolinon, a hosszú láncú zsírsavak, (*E*)- β -kariofillén, 2,4-dihidroxi-7-metoxi-1,4-benzoxazin-3-on, illetve az etilengáz. A lárvákkal végzett viselkedéstudományokban tapasztalt mozgásmintázatok (lelassult mozgás, gyors fordulások stb.) az említett vegyületek csalogató hatására utalnak, de még további kísérletekre van szükség ennek tisztázására. A gyökerek közvetlen közelében aztán nem az illékony, úgynevezett kontakt anyagok kapnak szerepet, melyek a tápnövény elfo-