

## ***Főbb kérdések és megoldások a talajlégzés vizsgálatának témakörében***

LELLEINÉ KOVÁCS ESZTER

---

MTA Ökológiai és Botanikai Kutatóintézete, 2163 Vácrátót, Alkotmány u. 2-4.

E-mail: [eszter@botanika.hu](mailto:eszter@botanika.hu)

### ***Összefoglalás***

A TALAJ SZÉNDIOXID-KIBOCSÁTÁSÁNAK, mint a légkör-bioszféra kölcsönhatásokat nagy részben meghatározó folyamatnak a tanulmányozására, mérésére számos módszer áll rendelkezésre. Ezek a módszerek eltérő tér- és időléptékben alkalmasak a folyamatok megragadására. Fontos lehet a vizsgálatok során a talajlégzés komponenseinek szétválasztása is, hozzájárulásuk arányának meghatározása a teljes kibocsátáshoz, illetve dinamikájuk elkülönített elemzése. Ebben az áttekintő tanulmányban sorra vesszük a talajlégzés mérésének módszereit, gyakorlati alkalmazásukat, a vizsgálatok tapasztalatait, valamint a terület egyik legproblematisabb kérdését: a talajlégzés összetevőinek meghatározását és elkülönítésük lehetőségeit laboratóriumban és a terepen.

*Kulcsszavak:* gyökérlégzés, klímaszimulációs kísérletek, rhizomikrobiális respiráció, talajlégzés mérése

### ***Bevezetés***

A talajlégzés, vagyis a CO<sub>2</sub> talajból légkörbe áramlása a földi anyagforgalom egyik legfontosabb komponense, és elsősorban a talajban zajló mikrobiális lebontó folyamatok, valamint a növényi gyökerek respirációjának a következménye (Hanson *et al.* 2000, Kuzyakov 2006). Ezekhez képest jóval kisebb mértékű, mindössze néhány százaléknyi a talaj makro- és mezofaunájának CO<sub>2</sub> kibocsátása (Ke *et al.* 2005).

A talajlégzés meghatározása több szempontból is fontos. 1. A talajlégzés intenzitásának értékei nagyléptékű szénforgalmi vizsgálatok bemeneti adatait képezhetik, hozzájárulhatnak a bioszféra-atmoszféra interakciók feltárásához, szénmérlegek készítéséhez (társulástól a biomokon át globális szintig), szükségesek a globális klímaváltozás-modellek kialakításához, és ezzel kapcsolatos predikciók megtételéhez (Davidson & Janssens 2006, Davidson *et al.* 2006, Jones *et al.* 2003). 2. A talajok CO<sub>2</sub> kibocsátási intenzitása alapját képezi (főleg mezőgazdasági) talajok minősítésének, és – gyakran bakteriális biomassza- és enzimműködés-vizsgálatokkal együtt – hozzájárul talajszennyezések következményeinek becsléséhez (Borken *et al.* 2002, Hund-Rinke & Simon 2007). 3. Sok

esetben a talajlégzés természetének és ezen keresztül a talajban zajló folyamatoknak, valamint az azokat meghatározó tényezőknek a vizsgálata a cél: pl. a talaj CO<sub>2</sub> kibocsátásáért felelős egyes összetevők elkülönítése, arányuk meghatározása (Hanson *et al.* 2000, Kuzyakov 2006), illetve a talajlégzést befolyásoló hatások elemzése, mint a talajhőmérséklet (Fang & Moncrieff 2001, Tjoelker *et al.* 2001), a talajnedvesség (Orchard & Cook 1983, Wilson & Griffin 1975), a talaj tápanyagtartalma, valamint a külső CO<sub>2</sub> koncentráció hatása (Bruce *et al.* 2000, Hendrey *et al.* 1993, Sørensen *et al.* 2004). 4. Végül célkitűzés lehet közvetlenül magának a talajlégzés vizsgálati, mérési módszertanának a kidolgozása, módszerek összehasonlítása, megbízhatóságuk elemzése is (Dore *et al.* 2003).

A talaj CO<sub>2</sub> kibocsátásának mértékét különféle módszerekkel lehet meghatározni. Bár a talajlégzés mérésének fontossága vitathatatlan a földi szénforgalom dinamikájának megértéséhez, létkérdés bizonyos változások előrejelzésében, azonban a számos módszer mindegyikének megvannak az előnyök mellett a maguk korlátai is; nincs tökéletes módszer. Például Rustad *et al.* (2000) a Föld szénkészleteinek és szénforgalmának mennyiségi viszonyai, valamint a talajlégzésre ható fő tényezők áttekintése után a talajlégzés mérési módszereivel, a térbeli és időbeli skálázás, a „felskálázás” (a kamra szintű mérésektől az ökoszisztéma szintű szénmérleg becslésekig vezető rögös út), valamint a heterotróf és autotróf légzés elkülönítésének nehézségeivel foglalkozik.

A közvetlen mérési metódusokon túl ma már számos távérzékelési és modellező eszköztár áll rendelkezésre, természetesen mindegyik a maga előnyeivel, hátrányaival és többé-kevésbé becsülhető hibáival. Adott módszerek csak adott tér- és időléptékben használhatók, így a célnak kell meghatározni a talajlégzés mérési módszerét. Ezen túl a módszerek sokszor ki is egészíthetik egymást: mechanisztikus modellek validálása terepi mérések alapján (Davidson & Janssens 2006), illetve mérési adatok empirikus modellekkel fejlesztése (Frank *et al.* 2002, Mielenick & Dugas 2000, Raich *et al.* 2002, Reichstein *et al.* 2003), vagy a közvetlen mérési és a távérzékelési módszerek kombinálása (Dore *et al.* 2003, Inoue *et al.* 2004, Janssens *et al.* 2001, Miglietta *et al.* 2007).

## *A talaj CO<sub>2</sub> kibocsátásának mérési módszerei*

Wilson & Griffin (1975) a mikroorganizmusok oxigénfogyasztásának mérésével becsülték a CO<sub>2</sub> keletkezését egy elektrolitikus respirométer és a hozzá csatlakoztatott nyomáskompensátor segítségével. Ez egy zárt respirációs kamra, melyben a mikroorganizmusok oxigén fogyasztását elektrolízis útján, egyenletes ütemben termelt oxigénnel pótolják, és mérik adott idő alatt a nyomásváltozást.

Az alkáli abszorpciós módszer esetében egy lúgos oldatban vagy anyagban (általában NaOH, KOH vagy szódamész) elnyelezik a szén-dioxidot, mely adott idő alatt fejlődik egy statikus kamrában, és így az oldat súlygyarapodásából (Rochette & Flanagan 1997, Singh & Gupta 1977) vagy a maradék lúg sósavas titrálásával (Wildung *et al.* 1975) számítják ki a mennyiségét. Számos összehasonlító vizsgálat azt mutatja, hogy az alkáli abszorpciós módszer a talaj mérsékelt CO<sub>2</sub> kibocsátása esetén felülbecsüli,

míg intenzív CO<sub>2</sub> termelés esetén alulbecsüli a respirációs rátát (Grogan 1998, Jensen *et al.* 1996, Pumpanen *et al.* 2004).

Gázkromatográfias módszernél a talajra helyezett zárt kamrában fejlődik a CO<sub>2</sub>, a kamralevegőből injekciós tüvel mintát vesznek, majd gázkromatográfban megméri a CO<sub>2</sub> tartalmat (Emmett *et al.* 2004, Orchard & Cook 1983). Itt nagyon fontos az inkubációs idő pontos meghatározása, mert a kamrában megnövekedett CO<sub>2</sub> koncentráció befolyásolja a talajból való kiáramlás sebességét.

Hasonló a helyzet, mikor egy infravörös gázanalizátorhoz (IRGA) kapcsolt zárt dinamikus kamrában a levegő a kamra belseje és az IRGA között cirkulál, és a kibocsátás ütemét a CO<sub>2</sub> koncentráció időbeli változásából becsülik. Ezzel szemben a nyílt, dinamikus rendszerű kamrában a kamra levegője folyamatosan a külső levegővel keveredik, hogy elkerüljék a külső körülményeknél magasabb CO<sub>2</sub> koncentrációjú levegővel való akkumulációt. Amikor kialakul egy dinamikus egyensúly a kamralevegő és a talaj CO<sub>2</sub> készlete között, a kibocsátás mértékét a külső levegő és a kamralevegő CO<sub>2</sub> tartalmának különbségéből, valamint a levegő áramlási sebességéből számítják. A kamrahatás problémáját többek között Lund és munkatársai vetették fel (Lund *et al.* 1999), miszerint a kamra külső levegőnél nagyobb CO<sub>2</sub> nyomásának hatására a kamrával mért kibocsátási értékek alacsonyabbak lesznek a valóságosnál, így lehet, hogy a légköri CO<sub>2</sub> koncentráció emelkedés hatására sok tanulmányban leírt növekvő ökoszisztéma-szénfelvétel csak egy műtermék, amely a kamranyomás hatásából adódik.

A talaj CO<sub>2</sub> profil technikával a talaj vertikális CO<sub>2</sub> tartalmát és áramlási mintázatát becsülik, valamint azok időbeli (napi, évszakos) változásait követhetik nyomon. Itt különböző talajmélységekbe leszúrt szondákkal vesznek mintát a talajlevegőből, és azt elemzik infravörös gázanalizátorral vagy gázkromatográfias módszerrel (Risk *et al.* 2002).

A távérzékeléses mérési módszerek közül az ún. légörvény-kovarianciás (eddy covariance) technikával egy meteorológiai toronyból mérnek CO<sub>2</sub> áramokat, valamint a levegő mikrometeorológiai jellemzőit. Előnye, hogy viszonylag nagy terület, teljes ökoszisztéma CO<sub>2</sub> áramlási viszonyait, szénmérlegét lehet így becsülni időben folyamatosan, azonban a keletkezett szén-dioxid eredetéről, forrásainak arányáról semmit sem tudhatunk meg, ehhez kiegészítő méréseket kell végezni a területen (Baldocchi *et al.* 2001, Flanagan 2002, Reichstein *et al.* 2002). A CO<sub>2</sub> áramok mérésének pontosításához a statikus tornyok mellett adott magasságokban repülőgépről is lehet méréseket végezni, ezzel kiegészítve a légköri adatokat a szénmérleg számításához (Miglietta *et al.* 2007).

A termális távérzékelés lehetőségeit vizsgálták az ökoszisztéma feletti CO<sub>2</sub> fluxus becslésére Japánban (Inoue *et al.* 2004). Az ökoszisztéma feletti CO<sub>2</sub> áramot légörvény kovariancia módszerrel mérték összekapcsolva termális és optikai távérzékeléses mérésekkel, valamint mikrometeorológiai, talajfelszíni és növényzeti mérésekkel. Az eredmények azt mutatták, hogy a talajfelszíni hőmérsékletnek domináns hatása van a mikrobiális respirációra, valamint azokra a fizikai folyamatokra, melyek meghatároz-

zák a CO<sub>2</sub> gázcsere a talaj és a légkör között. A távérzékelte felszíni hőmérséklet tehát hasznos információkkal szolgálhat a felszínközeli CO<sub>2</sub> forgalom folyamatainak vizsgálatához, valamint az ökoszisztéma feletti CO<sub>2</sub> kibocsátás kvantitatív becsléséhez.

## *A talajlégzés hőmérséklet- és nedvességfüggésének vizsgálati lehetőségei*

A klímaváltozás jövőbeni következményeinek becsléséhez fontos a bioszféra-légkör kölcsönhatások ismerete. Vajon a melegedés mennyire, milyen függvény szerint növeli a talajok CO<sub>2</sub> kibocsátását? Hogyan befolyásolják ezt a folyamatot a talajok nedvesség viszonyai, valamint a légkör CO<sub>2</sub> koncentrációjának változásai?

Legegyszerűbb a talajok laboratóriumi vizsgálata, ahol kontrollált körülmények között mérhető a begyűjtött talajok hőmérséklet- és talajnedvesség-változásokra adott talajlégzés-válaszai (Bekku *et al.* 2003, Reichstein *et al.* 2000, 2003, Tingley *et al.* 2006). Kätterer *et al.* (1998) irodalmi áttekintést tesz laboratóriumi C-mineralizációs inkubációs vizsgálatokról, valamint azon tanulmányok adatait elemzi, ahol különböző hőmérsékleteken vizsgálták azonos szubsztrát bomlását, és legalább 4 elemű idősorokból voltak adatok (azonos szubsztrát – azonos hőmérséklet). Csak azt vették figyelembe, ahol pozitív(!) összefüggés volt a hőmérséklet és dekompozíció között. Felmerül azonban a kérdés, hogy a laboratóriumban kapott eredmények mennyire vonatkoztathatók a terepi körülményekre. Például a hőmérsékletválasz sokszor idővel „aklimatizációt” mutat (csökken a hőmérséklet-érzékenység), ami utalhat a talajminta szerves széntartalmának kimerülésére is, nem feltétlenül a baktériumközösség fiziológiai válaszát, átalakulását jelenti. Ráadásul a destruktív mintavétel megszakítja a talajlégzésben fontos szerepet játszó talaj-növény kapcsolatot is. Ezt a problémát látszik kiküszöbölni Fang & Moncrieff (2001), akik viszonylag nagyméretű (31 cm átmérőjű és 45 cm mély) talajblokkokat vizsgáltak és inkubáltak különböző hőmérsékleteken és talajnedvesség-értékek mellett. A korábbi vizsgálatoktól eltérően náluk nem csökkent a mért talajlégzés az inkubációs idővel, mivel elég nagy volt a talajmonolit, nem merült ki a szervesanyaga, és nem távolították el belőle a gyökereket sem (a gyökérlégzés és a gyökér-mikroba interakció alapvető a talajlégzés fenntartásában).

Nagyobb, akár állományszintű léptéke a kontrollált talajnedvességi és hőmérsékleti körülmények megteremtésének az úgynevezett mikrokozmosz kísérletek köre, mint például a Biosphere 2 Center (Murthy *et al.* 2003). Az ilyen típusú kísérleteket sokszor összekapcsolják a légköri CO<sub>2</sub> koncentráció szabályozásával is.

Másik köre a vizsgálatoknak a terepi talajlégzésmérés, amikor hónapokon, akár éveken keresztül, adott területen, adott gyakorisággal méréseket végeznek, és a kérdéses ökoszisztéma talajlégzésválaszait szélesebb hőmérsékleti és talajnedvesség-rezsimben figyelhetik meg (Frank *et al.* 2002, Mielnick & Dugas 2000, Parker *et al.* 1983), esetleg nagyobb területről, például valamilyen gradiens mentén gyűjtenek

hosszabb távon adatokat (Xu & Qi 2001). Ez a módszer sok kérdésre megbízható, terepi választ adhat, persze a nem jósolható befolyásoló faktorok, és így a laboratóriumi körülményeknél várhatóan nagyobb variancia miatt az ismétlésszámot nagyobbra kell tervezni.

Az utóbbi időben öröndetes módon egyre nő a klímaszimulációs terepi kísérletek száma, ami lehetőséget ad a környezeti tényezők nem csupán jelenlegi, hanem a klimatológusok által a jövőre előrejelzett varianciáinak, valamint azok állomány-szintű hatásainak tanulmányozására. Általában három tényezőt szoktak kísérletesen változtatni: a hőmérsékletet (Shaver *et al.* 2000), a csapadék- illetve nedvességviszonyokat (Sponseller 2007), valamint a légköri CO<sub>2</sub> koncentrációt (Baldochi *et al.* 2001). A melegítés lehet aktív, pl. infravörös sugárzókkal, lámpákkal (Luo *et al.* 2001), és lehet passzív, pl. hővisszaverő tetőkkel (Beier *et al.* 2004, Lellei-Kovács *et al.* 2008), történhet felülről állványzatról vagy a talaj szintjén, lehet napi 24 órás, vagy csak éjszakai. Tarthat egész éven át, vagy csak a vegetációs időszakban. Shaver *et al.* (2000) áttekinti a különböző módszerek előnyeit, hátrányait, a közvetlen és közvetett hatások szerepét, valamint a válaszok eltérő időskálájának jelentőségét. Rustad *et al.* (2001) áttekintést ad a különböző ökoszisztémák melegítésre történő CO<sub>2</sub> kibocsátás változásairól.

Mindenképpen lényeges, hogy hosszú távú következtetéseket biztonsággal csak hosszú távú vizsgálatokból vonhatunk le. Ezért rendkívül nagy jelentőségűek a hosszú távú, monitoring jellegű terepi kísérletes mérésorozatok az ökoszisztéma folyamatok megértésében és előrejelezhetőségében.

## *Miért fontos a talajlégzés komponenseinek az elkülönítése?*

A talajok CO<sub>2</sub> termelését a talajban zajló bonyolult folyamatok együttese adja, melyben a különböző eredetű szubsztrátok mikrobiális lebontása mellett szerepet játszik a gyökérlégzés és a talaj mezofaunájának légzése is. A CO<sub>2</sub> kibocsátás komponenseinek szezonális változásokra adott válasza mind mértékében, mind időléptékét tekintve jelentősen eltérhet egymástól. Hosszabb távon a klímaváltozásra adott válaszok is igen különbözőek lehetnek. Ráadásul a légköri, a klimatikus, valamint a tájhasználatbeli globális és regionális változások kihatnak nemcsak a növényi, hanem a talaj mikrobiális társulásainak összetételére is, ami alapvetően megváltoztathatja az ökoszisztéma-légkör interakciókat (Schimel & Gullledge 1998).

Amikor CO<sub>2</sub> kibocsátást mérünk, számos különböző tér- és időléptékű folyamat együttes eredményét mérjük. Ezek a folyamatok a környezet változásaira eltérően válaszolhatnak (pl. az olyan abiotikus tényezőkre, mint a hőmérséklet vagy a talajnedvesség, a gyökérszövet élettani folyamatai eltérően reagálhatnak, mint a mikrobáké (Boone *et al.* 1998)), így nehéz ezekre a folyamatokra, de még közös eredőjükre is adekvát megállapításokat tenni. Ezért tehát lényeges a talaj CO<sub>2</sub> kibocsátás jövőbeni változásainak becsléséhez az adott ökoszisztémában a komponensek arányának ismer-

rete. Az elkülönítés fontos a szénmérleg vizsgálatoknál, a szénallokációs és szénelnyelési kutatásoknál is, mert sok tanulmány szerint a talaj megfigyelt  $\text{CO}_2$  kibocsátásának nagy részét a gyökérlégzés teszi ki.

A komponensek abszolút mennyisége és egymáshoz való aránya is változhat térben és időben (napi időjárástól függően és szezonálisan is). Pendall *et al.* (2001) szerint egy búzaföldön szabadföldi  $\text{CO}_2$  hozzáadásos (Free Air Carbon-dioxide Enrichment, FACE) kísérletben télen egyáltalán nem volt gyökérlégzés, míg a korai növekedési időszakra elérte a maximumát, és 65%-a lett a teljes talajlégzésnek.

Ezen kívül még a mikrobiális közösségen belül is eltérő a  $\text{CO}_2$  kibocsátás intenzitása és térbeli-időbeli mintázata (Schimel & Gullledge 1998). Általánosságban az eukarióták, például a gombák lebontó folyamatai hatékonyabbak, kevesebb szén lélegeznek el az összes biomasszájukhoz képest, mint a baktériumok, azonos körülmények között, adott idő alatt. Természetesen a baktériumok különböző anyagcseréjű csoportjai között is lényeges különbségek vannak a lebontás hatékonyságában.

A talajnak, mint a légköri szén-dioxid pufferének elnyelő vagy kibocsátó szerepe nagyban függ a talaj széntartalmának eredetétől, formájától és stabilitásától. Lényeges a kibocsátott szén eredetének (növényi eredetű  $\text{CO}_2$ , vagy a talaj szervesanyagából (Soil Organic Matter, SOM) származó  $\text{CO}_2$ ), megállapítása a talaj, illetve az ökoszisztéma szénkészletének jövőbeni sorsát illető előrejelzések szempontjából is (Trumbore 1997).

## *Eljárások a talaj $\text{CO}_2$ kibocsátás komponenseinek elkülönítésére*

Míg a talajfelszínen át kibocsátott  $\text{CO}_2$  mérése viszonylag egyszerű, jóval problematikusabb annak felbontása gyökér-, rhizoszféra- és mikrobiális légzésre (Hanson *et al.* 2000, Kelting *et al.* 1998). Kuzyakov (2006) a  $\text{CO}_2$  kibocsátás forrásairól és azok elkülönítési módszereiről készített áttekintést. Ebben öt komponenst különböztet meg a szén kicserélődési üteme és átlagos tartózkodási ideje alapján: 1. gyökérlégzés; 2. rhizomikrobiális légzés; 3. növényi maradványok lebontása; 4. növényi maradványok vagy gyökér exudátumok indukálta mikrobiális szervesanyag-lebontás (SOM); 5. talaj szervesanyag (SOM) mikrobiális lebontása növényi maradványoktól ill. gyökér exudátumoktól mentes talajban. Ezeket a kibocsátó forrásokat lehet azután különféleképpen csoportosítani: gyökér-, növényi vagy SOM eredetű  $\text{CO}_2$ ; rhizoszféra vagy alaprespiráció; heterotróf (mikrobiális) vagy autotróf szervezetek respirációja.

Kuzyakov (2006) az elkülönítés következő fajtáit, módszereit veszi számba:

1. Gyökér eredetű  $\text{CO}_2$  és SOM eredetű  $\text{CO}_2$  elkülönítése;
2. Gyökér- és rhizobiális légzés elkülönítése, azaz a gyökér eredetű szén-dioxid autotróf és heterotróf komponenseinek becslése;
3. Növényi maradványok mikrobiális lebontásának vizsgálata;
4. A növényzet indukálta mikrobiális SOM lebontás során keletkezett  $\text{CO}_2$  becslése;

1. A gyökér eredetű  $\text{CO}_2$  és a SOM eredetű  $\text{CO}_2$  elkülönítése esetén a gyökérekizárásos módszernél a növényel benőtt és a puszta talajt hasonlítják össze, megméri a  $\text{CO}_2$  kibocsátási rátát gyökézzel és gyökérzet nélkül is (ha a vegetáció jellege engedi, pl. nyílt homokpusztagyepben, egyszerűen növénymentes és növény borította helyen is mérnek (gyökér gap analízis), de leggyakrabban be kell avatkozni gyökér-eltávolítással, fák körülárkolásával stb.), és a két mérés különbségét tekintik gyökér eredetű légzésnek (Fisher & Gosz 1986, Hanson *et al.* 2000). Azonban a növényel benőtt terület hő- és vízháztartása, tápanyagforgalma is más, mint a puszta talajé, valamint az esetleges beavatkozás is mind befolyásolja a szénforgalmat. A rhizoszféra légzése 2-3-szorosa is lehet a csupasz talajénak. Gyepekben használatos a felszín feletti növényi részek árnyékolása vagy levágása (Craine *et al.* 1999), erdőkben pedig a tarvágás, mint a gyökér-eltávolításnál kíméletesebb módszer. Ahogy leáll a fotoszintézis, leáll az új asszimilátumok transzportja is a gyökérbe. Röviddel a kezelés után nem különbözik nagyon a tápanyagforgalom és a nedvességtartalom a kontrollétól. Ez a módszer azonban nem zárja ki teljesen a gyökérlégzést, sőt, előfordulhat, hogy az éppen megnő. Erdőben a tarvágás és gyökérekizárás helyett alkalmazhatják a fagyűrűzést, mikor a hánccs elzárásával akadályozzák meg a friss asszimilátumoknak a levélből a gyökerekbe jutását (Högberg *et al.* 2001). A regressziós technika a gyökér biomassza, valamint a gyökér és a rhizobiális mikroorganizmusok által kibocsátott  $\text{CO}_2$  mennyisége közötti összefüggésen alapul (Kucera & Kirkham 1971). Komponens integráció során a  $\text{CO}_2$  kibocsátásban résztvevő szénkészleteket különítik el, és minden komponensből, kontrollált körülmények között, külön mérik a  $\text{CO}_2$  kibocsátási rátákat (Hanson *et al.* 2000). Általában a következő komponenseket vizsgálják: avar, kimosással vagy szitálással elkülönített gyökerek, gyökérmentes talaj. Van, hogy külön nézik a gyökérmentes és a rhizoszféra talajt. Azután a komponensek  $\text{CO}_2$  kibocsátási rátáit a tömegük arányában összeadják, és így állapítják meg a teljes  $\text{CO}_2$  effluxot. Ideális esetben az intakt talaj összes  $\text{CO}_2$  kibocsátását ezzel párhuzamosan mérik, és összehasonlítják az egyes kompartmentek effluxának kapott összegével. Van, hogy csak a gyökereket különítik el és mérik meg a légzésüket infravörös gázanalizátorral, oxigén elektróddal vagy alkáli abszorpciós technikával – ez a komponens integráció rövidített változata (Craine *et al.* 1999, Kelting *et al.* 1998). A többi komponens egységesen SOM eredetűnek tekintik, és a teljes  $\text{CO}_2$  effluxból számolják. *In situ* gyökérlégzés mérés esetén hasonlóképpen járnak el, csak a gyökeret nem vágják el, hanem kiássák, és talajszemcsékkel vagy azok nélkül, küvetében IRGA-val megméri a  $\text{CO}_2$  kibocsátását. Különböző izotópos ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  vagy  $^{18}\text{O}$ ) technikákkal, aktív jelöléssel (a légköri  $\text{CO}_2$  izotópos változatainak feldúsításával), vagy a természetes gyakoriságú stabil izotóp arányok meghatározásával (izotóp diszkrimináció) is lehetséges az egyes komponensek szétválasztása laboratóriumi vagy terepi körülmények között (Kuzyakov 2006).

2. A gyökér eredetű  $\text{CO}_2$  autotróf és heterotróf komponenseinek (gyökérlégzés és rhizomikrobiális légzés) becslése a legproblematisabb kérdés, hiszen ezek a folyamatok mind térben, mind élettani szempontból szorosan kapcsolatosak. Itt elsősorban

munkaigényes laboratóriumi módszerek állnak rendelkezésre, de a durva beavatkozások (komponens-integráció vagy levágott, talajtól elkülönített gyökér légzésének mérése) miatt az eredmények megkérdőjelezhetők. Még a legbiztosabb a szubsztrát-indukált respiráció mérése. A rhizomikrobiális és gyökér-respiráció elkülönítése céljából az izotópos technikák csak laboratóriumi körülmények között nevelt növényekre alkalmazhatók (Kuzyakov 2006).

3. A növényi maradványok mikrobiális lebontásának becslése viszonylag a legegyszerűbb. De amíg a talajba kerülő földfeletti holt szervesanyag (avar) mennyiségének becslése terepen is könnyűszerrel megoldható, addig a holt gyökerek arányát bármilyen bizonyossággal nehéz megállapítani. Szokásos módszerek a kizárásos technikák (hasonlóan a gyökérkizárásos módszerhez külön megméri a talajlégzést növényi maradványokat tartalmazó, valamint azoktól mentes talajon). Izotópos módszerrel vagy a jelölt növényi maradványokat helyezik jelöletlen talajba, és így mérik a talajlégzést, illetve a fejlődő szén-dioxidban a jelöletlen (SOM eredetű) és jelölt (növényi maradványból származó)  $\text{CO}_2$  arányát, vagy a  $^{13}\text{C}$  természetes abundanciája alapján számolnak:  $\text{C}_3$ -as növényi maradványokat mérnek  $\text{C}_4$ -es talajon és fordítva (Kuzyakov 2006).

4. A növényzet indukálta mikrobiális szervesanyag-lebontás következtében keletkezett  $\text{CO}_2$  becslése úgy történhet, hogy valamely izotópos technikával meghatározzák a növényekkel beültetett (vagy növényi maradványokat tartalmazó) talajon fejlődött SOM eredetű  $\text{CO}_2$  mennyiségét, és kivonják belőle a növénymentes (vagy növényimaradvány-mentes) talajon képződött SOM eredetű  $\text{CO}_2$  mennyiségét (Kuzyakov 2006).

A megfelelő módszer kiválasztása nagyban függ a vizsgálandó ökoszisztémától. Hanson *et al.* (2000) áttekintése alapján a következő módszereket használják erdőtalajoknál: komponens-integráció, gyökérkizárás, stabil szénizotóp ( $^{13}\text{C}$ ) technika. Ez utóbbi technika azért előnyös, mert sem nem zárja ki a természetes klimatikus vagy talajtényezőket, mint a laboratóriumi vizsgálat, sem nem destruktív, mely megváltoztatná a talaj tulajdonságait, pl. a talajnedvességet, mint a gyökérkizárás.

Egy további módszer a szelektív respirációs gátlás (selective inhibition: SI), melynél megfelelő antibiotikumok használatával meg lehet határozni adott talajban a gomba/baktérium arányt (Bailey *et al.* 2003). Hátránya, hogy mindenképpen laboratóriumi körülményeket igényel.

A számos elkülönítési módszer értékelése egyrészt a vizsgálat során az ökoszisztéma-folyamatokba történő beavatkozás mértéke szerint, másrészt a különböző ökoszisztémákban való egyetemes alkalmazhatósága alapján lehetséges. Szempont még az is, hogy a módszer mennyire különbözteti meg ténylegesen a talajlégzés komponenseit, és hogy mely komponensekre vagyunk egyáltalán kíváncsiak a vizsgálatunk során. Fontos, hogy a módszer mennyire reprodukálható, mennyire szubjektív, mennyire függ egyéni döntésektől az eredmény. Egy-egy vizsgálat tervezésekor természetesen az anyagi lehetőségeket is figyelembe kell venni, valamint a terepi alkalmazhatóságot és az egyszerűséget.



## Köszöntés

Hálás vagyok Láng Editnek, hogy felnyitotta a szemem a talaj működésének érdekeségeire, és a talajban zajló folyamatok varázslatos világára.

## Irodalom

- Bailey, V.L., Smith, J.L. & Bolton, H. (2003): Novel antibiotics as inhibitors for the selective respiratory inhibition method of measuring fungal: bacterial ratios in soil. *Biol. Fert. Soils* **38**: 154-160.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L.H., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X.H., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., U, K., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. & Wofsy, S. (2001): FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapour and energy flux densities. *Bul. Amer. Met. Soc.* **82**: 2415-2434.
- Beier, C., Emmett, B., Gundersen, P., Tietema, A., Peñuelas, J., Estiarte, M., Gordon, C., Gorissen, A., Llorens, L., Roda, F. & Williams, D. (2004): Novel approaches to study climate change effects on terrestrial ecosystems in the field: drought and passive nighttime warming. *Ecosystems* **7**: 583-597.
- Bekku, Y.S., Nakatsubo, T., Kume, A., Adachi, M. & Koizumi, H. (2003): Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils. *Appl. Soil Ecol.* **22**: 205-210.
- Boone, R.D., Nadelhoffer, K.J., Canary, J.D. & Kaye, J.P. (1998): Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* **396**: 570-572.
- Borken, W., Muhs, A. & Beese, F. (2002): Changes in microbial and soil properties following compost treatment of degraded temperate forest soils. *Soil Biol. Biochem.* **34**: 403-412.
- Bruce, K.D., Jones, T.H., Bezemer, T.M., Thompson, L.J. & Ritchie, D.A. (2000): The effect of elevated atmospheric carbon dioxide levels on soil bacterial communities. *Global Change Biol.* **6**: 427-434.
- Craine, J.M., Wedin, D.A. & Chapin, F.S. (1999): Predominance of ecophysiological controls on soil CO<sub>2</sub> flux in Minnesota grassland. *Plant Soil* **207**: 77-86.
- Davidson, E.A. & Janssens, I.A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**: 165-173.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A. & Luo, Y. (2006): On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub>. *Global Change Biol.* **12**: 154-164.
- Dore, S., Hymus, G.J., Johnson, D.P., Hinkle, C.R., Valentini, R. & Drake, B.G. (2003): Cross validation of open-top chamber and eddy covariance measurements of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a Florida scrub-oak ecosystem. *Global Change Biol.* **9**: 84-95.
- Emmett, B., Beier, C., Estiarte, M., Tietema, A., Kristensen, H.L., Williams, D., Peñuelas, J., Schmidt, I. & Sowerby, A. (2004): The response of soil processes to climate change: Results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* **7**: 625-637.
- Fang, C. & Moncrieff, J.B. (2001): The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.* **33**: 155-165.
- Fisher, F.M. & Gosz, J.R. (1986): Effects of trenching on soil processes and properties in a New Mexico mixed-conifer forest. *Biol. Fert. Soils* **2**: 35-42.
- Flanagan, L.B., Wever, L.A. & Carlson, P.J. (2002): Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biol.* **8**: 599-615.

- Frank, A.B., Liebig, M.A. & Hanson, J.D. (2002): Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biol. Biochem.* **34**: 1235-1241.
- Grogan, P. (1998): CO<sub>2</sub> flux measurement using soda lime: Correction for water formed during CO<sub>2</sub> adsorption. *Ecology* **79**: 1467-1468.
- Hanson, P.J., Edwards, N., Garten, C.T. & Andrews, J.A. (2000): Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**: 115-146.
- Hendrey, G.H., Lewin, K.F. & Nagy, J. (1993): Control of carbon-dioxide in unconfined field plots. In: Schulze, E.D. & Mooney, H.A. (eds.): *Design and execution of experiments on CO<sub>2</sub> enrichments*. Commission of the European Communities, Dissemination of Scientific and Technical Knowledge Unit, Brussels, pp. 309-328.
- Högberg, P., Nordgren, A., Buchmann, N., Taylor, A.F.S., Ekblad, A., Högberg, M.N., Nyberg, G. & Ottosson-Lofvenius, M. (2001): Large-scale forest gridling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* **411**: 789-792.
- Hund-Rinke, K. & Simon, M. (2007): Bioavailability assessment of contaminants in soils via respiration and nitrification tests. *Environ. Pollut.* (in press).
- Inoue, Y., Olioso, A. & Choi, W. (2004): Dynamic change of CO<sub>2</sub> flux over bare soil field and its relationship with remotely sensed surface temperature. *Int. J. Remote Sens.* **25**: 1881-1892.
- Janssens, I.A., Kowalski, A.S. & Ceulemans, R. (2001): Forest floor CO<sub>2</sub> fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. *Agricult. Forest Meteorol.* **106**: 61-69.
- Jensen, L.S., Mueller, T., Tate, K.R., Ross, D.J., Magid, J. & Nielsen, N.E. (1996): Soil surface CO<sub>2</sub> flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. *Soil Biol. Biochem.* **28**: 1297-1306.
- Jones, C.D., Cox, P. & Huntingford, C. (2003): Uncertainty in climate-carbon-cycle projections associated with the sensitivity of soil respiration to temperature. *Tellus* **55B**: 642-648.
- Kätterer, T., Reichstein, M., Andrén, O. & Lomander, A. (1998): Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biol. Fert. Soils* **27**: 258-262.
- Ke, X., Winter, K. & Filser, J. (2005): Effects of soil mesofauna and farming management on decomposition of clover litter: a microcosm experiment. *Soil Biol. Biochem.* **37**: 731-738.
- Kelting, D.L., Burger, J.A. & Edwards, G.S. (1998): Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* **30**: 961-968.
- Kucera, C. & Kirkham, D. (1971): Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* **52**: 912-915.
- Kuzyakov, Y. (2006): Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 425-448.
- Lellei-Kovács, E., Kovács-Láng, E., Kalapos, T., Botta-Dukát, Z., Barabás, S. & Beier, C. (2008): Experimental warming does not enhance soil respiration in a semiarid temperate forest-steppe ecosystem. *Com. Ecol.* **9** (in press).
- Lund, C.P., Riley, W.J., Pierce, L.L. & Field, C.B. (1999): The effects of chamber pressurization on soil-surface CO<sub>2</sub> flux and the implications for NEE measurements under elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biol.* **5**: 269-281.
- Luo, Y., Wan, S., Hui, D. & Wallace, L.L. (2001): Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* **413**: 622-624.
- Miglietta, F., Gioli, B., Hutjes, R.W.A. & Reichstein, M. (2007): Net regional ecosystem CO<sub>2</sub> exchange from airborne and ground-based eddy covariance, land-use maps and weather observations. *Global Change Biol.* **13**: 548-560.
- Mielnick, P.C. & Dugas, W.A. (2000): Soil CO<sub>2</sub> flux in a tallgrass prairie. *Soil Biol. Biochem.* **32**: 221-228.

- Murthy, R., Griffin, K.L., Zarnoch, S.J., Dougherty, P.M., Watson, B., Haren, J.V., Patterson, R.L. & Mahato, T. (2003): Carbon dioxide efflux from a 550 m<sup>2</sup> soil across a range of soil temperatures. *Forest Ecol. Manag.* **178**: 311-327.
- Orchard, V.A. & Cook, F.J. (1983): Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biol. Biochem.* **15**: 447-454.
- Parker, L.W., Miller, J., Steinberger, Y. & Whitford, W.G. (1983): Soil respiration in a Chihuahuan desert rangeland. *Soil Biol. Biochem.* **15**: 303-309.
- Pendall, E., Leavitt, S.W., Brooks, T., Kimball, B.A., Pinter, P.J., Wall, G.W., LaMorte, R.L., Wechsung, G., Wechsung, F., Adamsen, F., Matthias, A.D. & Thompson, T.L. (2001): Elevated CO<sub>2</sub> stimulates soil respiration in FACE wheat field. *Basic Appl. Ecol.* **2**: 193-201.
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I.A., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P. *et al.* (2004): Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricult. Forest Meteorol.* **123**: 159-176.
- Raich, J.W., Potter, C.S. & Bhagawati, D. (2002): Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biol.* **8**: 800-812.
- Reichstein, M., Bednorz, F., Broll, G. & Kätterer, T. (2000): Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples. *Soil Biol. Biochem.* **32**: 947-958.
- Reichstein, M., Tenhunen, J.D., Rouspard, O., Ourcival, J.M., Rambal, S., Miglietta, F., Peressotti, A., Pecchiari, M., Tirone, G. & Valentini, R. (2002): Severe drought effects on ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biol.* **8**: 999-1017.
- Reichstein, M., Rey, A., Freibauer, A., Tenhunen, J., Valentini, R., Banza, J., Casals, P., Cheng, Y., Grünzweig, J.M., Irvine, J., Joffre, R., Law, B.E., Loustau, D., Miglietta, F., Oechel, W., Ourcival, J.M., Pereira, J.S., Peressotti, A., Ponti, F., Qi, Y., Rambal, S., Rayment, M., Romania, J., Rossi, F., Tedeschi, V., Tirone, G., Xu, M. & Yakir, D. (2003): Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochem. Cy.* **17**: 1104.
- Risk, D., Kellman, L. & Beltrami, H. (2002): Carbon dioxide in soil profiles: Production and temperature dependence. *Geophys. Res. Lett.* **29**: 1087.
- Rochette, P. & Flanagan, L.B. (1997): Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci. Am. J.* **61**: 466-474.
- Rustad, L.E., Huntington, T.G. & Boone, R.D. (2000): Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry* **48**: 1-6.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J. & GCTE NEWS (2001): A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecol.* **126**: 543-562.
- Schimel, J.P. & Gullledge, J. (1998): Microbial community structure and global trace gases. *Global Change Biol.* **4**: 745-758.
- Shaver, G.R., Canadell, J., Chapin III, F.S., Gurevitch, J., Harte, J., Henry, G., Ineson, P., Jonasson, S., Melillo, J., Pitelka, L. & Rustad, L. (2000): Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis. *BioScience* **50**: 871-882.
- Singh, J.S. & Gupta, S.R. (1977): Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot. Rev.* **43**: 449-528.
- Søe, A.R.B., Giesemann, A., Anderson, T.H., Weigel, H.J. & Buchmann, N. (2004): Soil respiration under elevated CO<sub>2</sub> and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. *Plant Soil* **262**: 85-94.

- Sponseller, R.A. (2007): Precipitation pulses and soil CO<sub>2</sub> flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biol.* **13**: 426-436.
- Tingley, D.T., Lee, E.H., Waschmann, R., Johnson, M.G. & Rygiewicz, P.T. (2006): Does soil CO<sub>2</sub> efflux acclimatize to elevated temperature and CO<sub>2</sub> during long-term treatment of Douglas-fir seedlings? *New Phytol.* **170**: 107-118.
- Tjoelker, M.G., Oleksyn, J. & Reich, P. (2001): Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q<sub>10</sub>. *Global Change Biol.* **7**: 223-230.
- Trumbore, S.E. (1997): Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *Colloquium Paper in Proc. Nat. Acad. Sci.* **94**: 8284-8291.
- Wildung, R.E., Garland, T.R. & Buschbom, R.L. (1975): The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* **7**: 373-378.
- Wilson, J.M. & Griffin, D.M. (1975): Water potential and the respiration of microorganisms in the soil. *Soil Biol. Biochem.* **7**: 199-204.
- Xu, M. & Qi, Y. (2001): Spatial and seasonal variations of Q<sub>10</sub> determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan forest. *Global Biogeochem. Cy.* **15**: 687-696.