

Füves ökoszisztémák CO₂-forgalma

MTA doktori értekezés
tézisei

2010

Nagy Zoltán

Bevezetés

A gyepek ökoszisztémák stabilitása, illetve sérülékenysége

A Föld ökoszisztémái között fontos helyet töltenek be a füves területek. Fontosságuk elsődleges ökoszisztéma funkcióikon, - így szénmérlegükön és vízgazdálkodásukon - keresztül például élelmiszer-termelő vagy klíma-szabályozó képességükben nyilvánul meg. Ezek a funkciók (ökoszisztéma szolgáltatások) például a klíma és a földhasználat módjának változásai miatt sérülhetnek.

A gyepek sérülékenységét például nettó ökoszisztéma gázcserejük (NEE, $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, $\text{gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$) éves skálájú változékonyságával mérhetjük, veszteséggé értékelve azt, ha az ökoszisztéma szenet (szén-dioxidot) veszít (forrás jelleg), s nyereséggé, ha szenet (szén-dioxidot) nyel el (nyelő jelleg). A napi vagy az éves mérleg kiszámításában is fontos, hogy a bevétel (a légkörből az ökoszisztémába irányuló C-fluxus, nyelő jelleg) negatív előjelű, míg a leadás (az ökoszisztémából a légkörbe irányuló C-fluxus, forrás jelleg) pozitív előjelű. A forrás jelleg éjjel, illetve a vegetációs perióduson kívül, vagy stressz - jellemzően vízhiány - alatt jellemző, jelentős szénvesztéssel is járhat, ezért hosszabb távon - a talaj termékenységének csökkenése miatt - a sivatagosodás egyik okozója lehet. A gyepek ökoszisztémák stabilitását és rezilienciáját mérhetjük szénmérlegük aszály alatti, illetve a regeneráció alatti alakulásával. A szénmérleg éves léptékű változékonyságát (interannuális variabilitása, IAV) célzó kutatásoknak ma is az egyik alapvető kérdése, hogy változik-e az ökoszisztéma válasza ugyanarra a behatásra, vagy sem. A stresszre adott válasz értékelésében azonban sokszor nem egyértelmű (és nem mindegy), hogy ugyanannak - az általában nem lineáris - kapcsolatnak egy másik szakaszát értékeljük, vagy valóban megváltozott ökoszisztéma válasszal állunk szemben. Ez a helyzet állhat elő például a gyepek csapadékmennyiség-változásokra (és szárazságstresszre) adott válaszainak értékelésekor, amikor kaphatjuk azt az eredményt, hogy az ökoszisztéma-működés változott, de értékelhetjük úgy is, hogy ez ugyanannak a - nemlineáris - válaszgörbének egy másik értelmezési tartományba eső szakasza.

A gyepgazdálkodás és klíma, oktatás

Az Európai Uniónak a Világkereskedelmi Szervezettel kötött egyik megállapodása szerint védővámok szűntek meg, amelyek hatékonyan gátolták - például - Brazíliából a számosállat, vagy általában a dél-amerikai borok importját. Ez a példa is mutatja, hogy - a probléma oktatási rendszereken keresztüli társadalmi tudatosításán túl - a globális felmelegedés mérséklésében bőven akadna tennivaló a gazdaság racionalizálásában is. Az ugyanis könnyen belátható, hogy a fent említett import tevékenységek jelentős szállítási eredetű légköri szennyezéssel járnak együtt. Amivel még biztosan: a vidékről a városokba irányuló vándorlással, az ezzel együtt járó szennyezés-növekedéssel. A gyepek lehetőséget adnak az extenzív gazdálkodásra, illetve csak extenzív gazdálkodás mellett jöhetnek szóba komoly szén-raktárként, amit számos kutatási projekt bizonyított, legújabbban az FP5-ös Greengrass és Carbomont programok. Ehhez azonban hozzá kell tenni,

hogy inkább a nitrogénben gazdag füves ökoszisztémák képesek ellátni ezt a funkciót. A fent említett kereskedelmi megállapodás azonban az érintett gyepterületeken túllegeltetést és az ezzel bizonyítottan együtt járó degradációt (később elsivatagosodást) okoz. Ezt mára a műholdfotó elemzések szintén meggyőzően bizonyítják, jóllehet a folyamatot (a degradáció okait) nem magyarázzák, csak egy-egy állapotot rögzítenek. A probléma azért nagy, mert az érintett gyepterületek is nagyok, illetve a felmelegedés és a leromló gyepek széndioxid kibocsátása között pozitív visszacsatolást mutató ciklus miatt.

A klímaváltozás összetett, vannak egymást erősítő és egymással szemben ható tényezők. A légköri CO₂ koncentráció emelkedése például a - a szárazodással járó - klímaváltozás egyik fő kiváltója, ugyanakkor a sztómaműködés befolyásolásával növeli a növények vízhasznosítását, ezzel - talán - enyhítve a szárazodás hatását. A fenti adaptáció lehetséges mértékének becslése a tudománytól most várt fontos információk egyike.

A mezőgazdaság, illetve az élelmiszer-termelés a klímaváltozásnak leginkább kitett gazdasági ágazatok közé tartoznak. A klíma változékonysága máris nagyobb, mint amelyhez a jelenlegi termelési rendszerek alkalmazkodtak. A 2003-as és 2007-es (de hazánkban a 2009-es év is) forró (az átlagosnál 6°C-kal melegebb) és aszályos (300 mm csapadékhiány) nyarú évek az átlaghoz képest 20-50%-os termés kieséssel jártak. A humán populáció növekedése ugyanakkor kritikusan fontossá teszi az élelmiszertermelés biztonságát, 2030-ra 50%-kal több élelmiszert lesz szükség, az - egyelőre - időleges élelmiszerhiány okozta áremelkedések (pl. 2008-ban) már jelentkeztek a stabil gazdaságúnak tartott országokban is. A bioüzemanyagok termelése kompetícióban van az élelmiszertermeléssel, a piaci mechanizmusok önmagukban nem tűnnek alkalmasnak a katasztrofális helyzetek elkerülésére.

A gyepek szénforgalomban játszott szerepe

A füves területek a globális szén-mérlegben mind nagy területük (a teresztris ökoszisztémákon belül) mind - elsősorban klimatikus meghatározott - (szén) forrás vagy nyelő kapacitásuk miatt fontosak. Víziányos körülmények között - ami a gyepterületekre általában (hegyi füves ökoszisztémák esetében kevésbé) jellemző - a szénforgalom nagyobb része ugyan a kevésbé stresszelt periódusra esik, de nagymértékű forrás-aktivitás jelentkezhet aszályok, illetve az ezekkel párhuzamosan előforduló hőhullámok alatt. Füves területeken a szénforgalom variabilitásának jelentős részét magyarázza a csapadékmennyiség, s e vonatkozásban kritikus fontosságú lehet a fenológiai állapot is, amelyben a szárazságstressz jelentkezik. A távérzékelés alkalmazása az egyik kézenfekvő eszköz a nagyobb térskálájú, a vegetáció működésének sérülékenységét célzó vizsgálatok elvégzéséhez. Az NDVI és a GPP közötti kapcsolat ma már a rutinszerűen vizsgáltak közé tartozik és a produkció éves változékonyságának leírására is alkalmas, tehát használatával az éves léptékű időbeli változékonyság is vizsgálható. A műholdas NDVI felvételek - sok esetben anyagilag nem

megengedhető - használata mellett a lokális (szélesebb spektrumú) méréseken alapuló NDVI számítása is elterjedt. A GPP-NDVI kapcsolat körüli szórást - a stressz mellett - részben okozhatja a növényzet fenológiája és az NDVI közötti kapcsolat is. A szénmérleg NDVI értékekből való becslése esetén különösen fontos, hogy a fenti kapcsolat mennyiben érvényes szárazságstresszelt vegetáció esetében.

A talajlégzés kritikus szerepe az ökoszisztéma szénmérlegében

Amíg a fotoszintézis egyes szakaszaira irányuló kutatások már hosszabb idő távlatában is komoly eredményekkel szolgálnak, az ökoszisztéma-szénmérleg egyéb tagjainak részletesebb vizsgálata az utóbbi években vált jellemzővé. Így vált világossá, hogy az összefoglalóan általában talajlégzésként említett komponens mérése komoly mérés technikai problémákat is felvet, egyebek között az összetevő folyamatok relatív jelentőségétől függően. Így a talaj szervesanyag-tartalom koreloszlása (amely egyúttal mennyiségi viszonyokat is jelez) egyben e frakciók bomlásának esetlegesen eltérő hőmérséklet-függését is jelenti, s ez - magasabb léghőmérsékletek esetén - más egyensúlyi eloszlás kialakulását eredményezi.

Mivel a mérések célja, hogy a mechanizmusokról kellő információt gyűjtve azok modellekbe építhetők legyenek, kritikus fontosságú ezeknek az információknak a megbízhatósága. A modellépítés egyik fázisa - az érzékenységvizsgálat - éppen ezért vált a modellezési munka standard elemévé.

A talajlégzés komponenseinek vizsgálatára azért van szükség, mert az ökoszisztéma szintű és kamrás mérésekből kiderült, hogy a talajlégzés messze nem modellezhető/számítható pusztán a hőmérséklet ismeretében, a folyamat révén kibocsátott széndioxid-mennyiség szignifikáns hányadát egy-egy nagyobb zivatar is okozhatja, nem beszélve arról, hogy egyelőre több talajlégzés-alkotó is jelöltje az esők utáni néhány óras - napos skálájú talajlégzési maximumoknak. Tehát amíg a levélszintű és állományszintű széndioxid-felvétel sebességét már meglehetősen biztonságosan kiszámítani képes mechanisztikus modellek léteznek, addig a talajlégzést tekintve az empirikus kapcsolatok használatának sokkal nagyobb a szerepe. Ez szükségképpen jelenti azt is, hogy az alkalmazott függvények esetleg csak lokális érvényűek, a modellekből származó becslések bizonytalansága pedig ennek megfelelően nagy lehet. A talajlégzés térbeli heterogenitása is ez utóbbit támasztja alá.

Célkitűzés

Jelen dolgozatban összefoglalt munkák objektuma általában a gyepek volt, ezen belül az ökoszisztéma szintű szénmérleg vizsgálatokat, a gázcsere léptékfüggését, illetve az emelt légköri CO₂-szintre adott válaszokat tekintve hazai homokpuszta- és löszpusztagyepéken, illetve azok jellemző fajain, stressz-ökofiziológiai vizsgálatokat szikes legelő és homokpusztagyep jellemző fajain vizsgáltunk. Az egyed és állományszintű vizsgálatok párhuzamossága e munka során mindvégig jellemző volt. Ennek oka összetett, részben felskálázási törekvésekből (állományszintű CO₂-felvétel becslések levélszintű mérésekből),

részben az állományszinten mért változók (LAI, produktivitás) alakulását egyedi szinten meghatározó folyamatok (relatív növekedési ráta, specifikus levélfelület) jellemzésének szükségességéből adódott.

Az ökoszisztéma szintű vizsgálatok célja a gyepevegetáció elsődleges funkcióinak, ezen belül a szénmérleg alakulásának folyamatos nyomon követése volt. A dolgozat megírásának idejében a bugaci gyepről hétéves, a mátrai gyepről hatéves idősorunk van, amelyek a származtatott anyag- és energiaáramokon kívül mikrometeorológiai adatokat is jelentenek, és lehetővé tették a szénmérleg interannuális változékonyságának vizsgálatát, a bruttó primer produkció és a vegetáció reflektanciája (NDVI) közötti összefüggés-vizsgálatot, illetve a vizsgált ökoszisztémák nyelő-forrás jellegének vizsgálatát a klimatikus változók függvényében. Az ökoszisztéma szintű szénmérleg megbízhatóságának javítására automata talajlégzésmérő rendszert fejlesztettünk ki (Balogh 2009), a talajlégzés mérésére alkalmazott gradiens módszer segítségével a bruttó primer produkció becslésének módszertanát más megvilágításba helyeztük.

Az elvégzett munka másik célja az emelkedő légköri CO₂ koncentráció hosszú távú növényökológiai hatásainak megismerése volt a löszpusztagyep példáján. A vizsgálatok a vegetáció szerkezetének, ill. a vegetáció és növények fiziológiájának, produkciójának és ökofiziológájának a vizsgálatára terjedtek ki. A munka a GATE (SZIE) Növénytani és Növényélettani Tanszéke korábban EU pályázati pénzügyi forrásokból felépített és működtetett "Globális klímaváltozás és Növényzet" kísérletes ökológiai kutatóállomásán (EU programok és GCTE tagja) biztosított feltételekkel folyt. Az emelt légköri CO₂-koncentráció (EC) vegetációra gyakorolt hatásait felül nyitott kamrákban (Open Top Chambers, OTC, 1994-től), illetve kamra nélküli expozíciós technikával (Free Air CO₂ Exposition, FACE, 1998-2001 között) vizsgáltuk. A vizsgálatokat transzplantált *Salvia-Festucetum rupicolae* löszgyep monolitokon végeztük mini FACE technikával. A mini FACE kísérleti teret 1998 nyarán építettük meg a Szent István Egyetem Botanikus Kertjében, Gödöllőn. A vizsgálatok 2001-ben fejeződtek be. Az EC kezelés mellett második faktorként a nitrogén-műtrágyázás hatását is vizsgáltuk. A vizsgálatok szintjei a levéltől, illetve a néhány percen belül mérhető növényfiziológiai paramétereiktől az állományok, illetve az éves biomassza-mennyiség, illetve borításváltozások szintjéig terjedtek.

Anyag és módszer

Gyepék szénforgalmának vizsgálata

Gyepék szénforgalmát mértük eddy kovariancia technikával 2002-től Bugac mellett illetve 2003-tól a Mátrában. Mára bizonyítottnak tekinthető, hogy sima felszínek feletti éjszakai mérések szinte biztosan alábecsülik az ökoszisztéma légzés értékét. Ennek oka, hogy napsütés és szél hiányában nem alakulnak ki, illetve a mérőrendszer számára nem érzékelhetőek azok az örvények, amelyek egyébként a nyomgázok - így a CO₂ - szállítását végzik. Ennek bizonyítéka, hogy a talajlégzés számos esetben meghaladta az eddy-technika által mért ökoszisztéma-

légzés értékét. A hiba folyamánként nem végezhető el megfelelően például az adatok hiánypótlása sem, illetve a használt algoritmussal az ökoszisztéma-légzést alulbecsüljük. Ezért szükségesnek látszik a meglévő eddy-állomások mérőrendszereinek kiegészítése automatikus - és az eddy rendszertől független - egyéb mérőrendszerekkel, amelyek adatai alapján a különböző (idő) skálájú C-mérlegek a valódi érték felé kényszeríthetők.

A talajlégzést (R_s) kezdetben a LI-6200-as, később a LI-6400-09 talajlégzésmérő kamrával ellátott LI-6400-as IRGA készülékekkel (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) mértük. A későbbiekben - részben az intézetben folyó doktori képzés keretében fejlesztettünk ki és alkalmaztunk egy automata, nyílt rendszerben működő talajlégzés mérésére alkalmas rendszert, amely a kutatómunka egyik eredménye. Ezt a talajlégzés-mérő rendszert sikeresen kalibráltuk is így az ezzel mért R_s -értékeket megbízhatóaknak tekinthetjük. Az említett rendszer, a talajbeli CO_2 -koncentráció gradiens módszer és az eddy kovariancia nagy korrelációjú eredményei biztatóak, mert az egyes rendszerek mérései egymástól függetlenek, s így azokra egyes feltételezések nagy biztonsággal megtehetőek. Ilyen például, hogy az R_s valószínűleg nem lehet nagyobb az ökoszisztéma teljes légzési aktivitásánál, vagy hogy a gradiens-módszerrel a talajfelszínre vonatkoztatott R_s nem lehet nagyobb a kalibrált kamrás mérésekből származó R_s -nél.

Az emelt légköri CO_2 koncentráció hatásának vizsgálatára alkalmazott módszerek

A növények emelt légköri CO_2 -szint alatti neveléséhez felül nyitott tetejű, műanyag falú, 1,28 m átmérőjű, 1 m magaságú kamrákat (OTC, 1994-), illetve a CO_2 -koncentráció emelését kamra nélkül biztosító 1,5 m átmérőjű mini FACE gyűrűket (Free Air CO_2 Enrichment, FACE, 1998-2001) alkalmaztunk. Az OTC rendszerben a kamra alján körben elhelyezkedő ventilált polietilén csőben emeljük meg a befűjt levegő CO_2 koncentrációját, amely a cső falába vágott nyílásokon keresztül jut a kamra terébe, majd a kamra nyitott tetején távozik. A mini FACE rendszer esetében a működés ezzel analóg, a különbség a kamra hiánya és az ebből eredő sokkal nagyobb CO_2 felhasználás, illetve fluktuáló CO_2 koncentráció. A kamrahatás (a kamra lényegesen melegebb környezeténél és a légáramlás szárító hatása is jelentős) elkerülése végett mégis érdemes volt ezt a technikát alkalmazni. A mini FACE rendszer felépítése 1998 júniusában fejeződött be, a fumigáció 2000 végéig tartott. A mini FACE rendszerben a CO_2 -szintek (jelenlegi légköri és emelt (célérték $600 \mu\text{mol mol}^{-1}$) CO_2 -koncentráció) mellett két N-műtrágyázási szint (0, illetve 100 kg ha^{-1}) is a kísérlet része volt.

A mini FACE rendszer 12 db $1,6 \times 1,6 \text{ m}$ méretű expozíciós egységből állt. A légszállítást, illetve a CO_2 -koncentráció megemelését egy 6 cm belső átmérőjű, 1,5 m átmérőjű gyűrűt alkotó belül perforált műanyag csővel oldottuk meg, amelybe levegőt és tiszta CO_2 - fűvattunk. A CO_2 -koncentrációt a gyűrűkön belül $600 \mu\text{mol mol}^{-1}$ értéken szabályoztuk. A második tényezőként bevont N-műtrágyázás mellett így egy blokkba 3 gyűrűismétlés tartozott.

Az elvégzett vizsgálatok a beltartalmi mutatókra (N- és C- tartalom, fotoszintetikus pigmentek mennyisége, rost-tartalom stb.), a levélszintű $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ gázcserére, a szénhidrát-tartalom napi dinamikájára, a hajtások vízpotenciál értékére irányultak, az állományszintű vizsgálatok között a felületi hőmérséklet mérése és a levélfelület-index ceptométeres méréseken alapuló becslése érdemel említést. A kísérlet alatt cönológiai vizsgálatokat (borításbecslés) is végeztünk az egyszikű/kétszikű borítás-arány nyomonkövetésére az egyes kezelésekben.

Eredmények

Az emelt CO_2 koncentráció a kontroll kezeléshez képest a sokfajú gyep állományának szintjén vizsgálva:

- Jó csapadék-ellátású évben növelte az összes (földterület-egységre vonatkoztatott) biomasza mennyiségét,
- Csökkentette a levélfelület-index értékét
- A vegetáció felszíni hőmérsékletének $1,5\text{-}2^\circ\text{C}$ -os emelkedését okozta.
- A talaj nedvességtartalmának megőrzése irányában hatott.
- A vizsgált kétszikű fajokban hosszabb időtartamú expozíció után is stimulálta a CO_2 -asszimilációt, míg az egyszikűekben a fotoszintézis le szabályozódását eredményezte.
- A kétszikű fajok borításának növekedését eredményezte az egyszikűek hátrányára.

A gyepek felett végzett ökoszisztéma skálájú CO_2 -áram mérésekből és talajlégzés-mérésekből származó eredmények:

- Megállapítottuk, hogy a vizsgált ökoszisztémák szén-veszteségének meghatározó része az aszályok alatt lép fel, egyéb módszerekkel nem detektálható sivatagosodást okozva.
- Megállapítottuk, hogy az ökoszisztémák aszályal szembeni különböző mértékű sérülékenységének hátterében a talaj vízgazdálkodása meghatározó szerepű, ennek kapcsolata a jövőben várható csapadékeloszlással együtt szintén értékes információnak tekinthető
- Megállapítottuk, hogy a homokos talajú bugaci legelő szénmérlegét tekintve az aszályal szemben kevésbé sérülékeny, mint a mátrai (Szurdokpüspöki), nagy agyagtartalmú talajon lévő gyep.
- A talajlégzés mérésére automata, többkamrás (bővíthető), rendszert fejlesztettünk ki és - független rendszerrel szemben - kalibráltunk. A rendszer hosszabb idő (~3 hónap) alatt is megfelelően működött.
- A fenti rendszer eredményei alapján valószínű, hogy az eddy kovariancia módszerrel az ökoszisztéma légzés értékét alábecsüljük.
- A gradiens-alapú talajbeli CO_2 -fluxus mérésekkel kimutattuk, hogy a bruttó primer produkció (GPP), illetve a nettó ökoszisztéma CO_2 gázcsere (NEE) és az ökoszisztéma légzés (R_{eco}) között a $\text{GPP} = -\text{NEE} + R_{\text{eco}}$ kapcsolat az általában alkalmazott félórás skálán nagy valószínűséggel nem, hanem csak hosszabb időtartamra reprezentálhatja az ökoszisztémában lezajló

folyamatokat. A hiba fő oka a lassúbb dinamikájú talajlégzés, illetve ennek a R_{eco} -n belüli dominanciája.

- A fenti hiba szárazságstresszelt ökoszisztémákban a talajrétegek között lefelé irányuló, jellemzően csapadékesemények után fellépő CO_2 -áramok következtében jelentős lehet.
- az eddy kovariancia módszerrel kapott adatsorok jelentős hányadát általában pótolni kell, ezért fentiek az adatpótlásban okozhatnak szignifikáns hibát.
- A fentiek alapján az eddy kovariancia módszerrel rövidebb (félórás) időszakra meghatározható *felszín* szén(dioxid)-mérleg, nem azonos az *ökoszisztémában* lejátszódó folyamatokból ugyanarra az időszakra számított szénmérleggel. A probléma megoldásához a talajbeli légzési folyamatok több szintben történő mérése, ezáltal az NEE mérési eredmények több oldalról való kényszerítése (szűrése), illetve a model - mérési adat fúzió (mint módszer) használata vezethet el.

Összefoglalás

A Kárpát-medence gyepevegetációja időjárás (alapvetően a csapadékmennyiség) által meghatározott éves szén-mérlegének alakulását jól példázza a 2003 és az azt követő év eltérő időjárása. A 2003 nyarán tapasztalt nagy aszály és magas hőmérsékleti értékek azt eredményezték, hogy a vizsgált gyepek a szénmérleg vonatkozásában forrássá - nettó szén kibocsátókká - váltak. A bugaci homokpusztagyep szénmérlege kevésbé, a szurdokpüspöki (Mátra), nagy agyagtartalmú barna erdőtalajon kialakult gypé nagyobb mértékben sérülékeny az aszályal, illetve az egyenlőtlen csapadékeloszlással szemben. A fizikai talajféleség meghatározza az ökoszisztéma időjárásra adott válaszainak változékonyságát. Ez döntően abban nyilvánult meg, hogy a bugaci homokos talajú gypé esetében a szénmérleg éves változékonyságát az éves csapadékösszeg önmagában meghatározta, a mátrai gypé esetében viszont nagyobb szerep jutott a csapadék éven belüli eloszlásának. A homoki gypé esetében fontos, hogy a gypé éves csapadékösszegre adott válasza a forrás-nyelő csapadékküszöb környezetében élesen változik, továbbá hogy ez a küszöb közel van a 10 éves – és csökkenő tendenciát mutató – éves átlagos csapadékösszeghez. Ez a veszéllyel jár, hogy az aszályal szembeni ökoszisztéma szintű sikeres adaptáció ellenére ez a gypé könnyen forrássá válhat egy adott év akár kisebb csapadékhiánya következtében is, s ennek a talaj szervesanyag-tartalma és ezzel potenciális termőképessége is kárát látja. A munka egyik fontos eredménye az aszályok erőssége és a talaj szervesanyag-tartalom csökkenése közötti pozitív visszacsatolás leírása. Ez a visszacsatolás nem csak közvetlen - hanem a potenciális termőképesség romlásával - a jövőben megnyilvánuló közvetett hatást is tartalmaz.

Miután a Föld gyepevegetációjának területaránya a tereszetris ökoszisztémákon belül nagy, a probléma klímára gyakorolt hatása sem

elhanyagolható. A kérdés nem csak az, hogy a gyepek, vagy a teresztris vegetáció általában képes lehet-e az üvegházhatás csökkentésére. Kérdés a gyepek ökoszisztémák aszályal szembeni stabilitásának és sérülékenységének mértéke is. Másként fogalmazva az, hogy hány egymást követő aszályos és magas léghőmérsékletű év indíthat el - például a gyeptalajok és általában nagyobb szervesanyag-tartalmú talajok esetében - szénvesztésen alapuló sivatagosodási folyamatokat, illetve ez lehet-e olyan mértékű, ami veszélyezteti az élelmiszer-termelést. A mezőgazdasági területek talajai vélhetően nem kevésbé sérülékenyek az aszályra, amint azt az OMSZ hazai első (hegyhátsági) eddy kovariancia mérési eredményei is mutatják. A probléma társadalmi tudatosítása fontos - de közvetlenül valószínűleg nem érhet el eredményt. Valószínű, hogy a jelenlegi gazdasági modell átalakítására lenne szükség a kibocsátás csökkentése érdekében. Az egyik fő szempont gazdaság működése során az ökoszisztémák működésében okozott károk mértékének valamely konszenzuson alapuló megállapítása lehetne. Annyi már most (a koppenhágai 2009-es klímacsúcs után) látszik, hogy a szennyezés jogának értékesítése - CO₂ kvótakereskedelem - valószínűleg nem megoldja, hanem súlyosbítja a problémát. A klímaváltozást kutatókkal, a klímaváltozás hatásaira figyelmeztetőkkel szemben a sajtóban időről időre megjelenő kritikákat leginkább tényekkel lehet cáfolni, s így lehet elérni azt is, hogy a döntéshozói helyzetben lévők - talán még időben - tegyék meg a szükséges nagy lépéseket a - talán mondható - paradigmaváltás érdekében. Ehhez viszont megbízható, a modellekben használható ismeretekre van szükség.

A légköri emelt CO₂-szint fentiekhez kapcsolódó egyik legfontosabb hatása a csökkentett sztómás vezetőképesség miatt várhatóan megemelkedő felszíni hőmérséklet. Ez egy mára sok tanulmány által bizonyított eredmény, már globális léptékben leírt következménnyel, ami az elfolyás növekedésében és a folyók vízhozamának megemelkedésében nyilvánult meg. De nem csak a sztómás válasz bír globális fontossággal, hasonlóan nagy jelentőségű a végső hatásban - a felületi hőmérséklet emelt légköri CO₂-szint hatására mutatott emelkedésében - a levélfelület-index csökkenése. A LAI csökkenése ugyanis csökkenti a párologtató felület nagyságát is. Ez utóbbi háttérben már nem élettani (mint a sztómakonduktancia esetében) hanem szervi-egyedi szintű - a levelek specifikus levéltömegében jelentkező s így a LAI-t befolyásoló - válasz áll. Az emelt CO₂-szint alatti N-hasznosítás javulása szintén fontos eredmény - és kapcsolható az antropogén N-depozícióhoz. A fenti válaszokban az érdekes, hogy egymástól nagyon távoli térszálakon lejátszódó folyamatok hogyan kapcsolódnak egymáshoz a vegetáció működésén keresztül. Nem evidens például, hogy a néhányszor tíz mikrométeres sztómák emelt légköri CO₂-szintre adott válasza szignifikánsan megnyilvánul az elszívárgás (mint vízmérleg tag) mennyiségében, sőt a víz - globális léptékben vett - körforgásában is. Ugyanígy érdekes téma, hogy a csökkenő látens hőáramot valaminek ellensúlyoznia kell a felszín energiamérlegében. Az antropogén N-depozíció növekedéshez kapcsolt fokozott ökoszisztéma szintű nyelő aktivitás, illetve, a sztóma szintű szabályozásnak tulajdonított csökkentett evapotranszpiráció egyaránt mutatja, hogy a növényi

ökoфизиология folyamatok több - az említett esetekben globális - skálán is szignifikánsan megnyilvánulnak.

E dolgozat olyan munkákból született, amelyek során kísérletet tettünk jellemzően a füves ökoszisztémák - és általában a szárazföldi növénytársulások - szénmérleg-méréseinek javítására. Talajlégzést mérő automata rendszert fejlesztettünk ki, s részben ennek alkalmazásával kimutattuk, hogy a füves ökoszisztémák CO₂-nyelő kapacitását valószínűleg túlbecsüljük. Ez a rendszer alkalmas a lehető legkisebb zavarás melletti mérésre és így a - jövőben - a fotoszintézis és a talajlégzés kapcsolatának pontosabb leírására is, továbbá bizonyítottan alkalmas hosszabb távú (hónapos) felügyelet - és meghibásodás - nélküli működésre.

A gradiens módszer alkalmazásával az eddig kisebb jelentőségűnek tekintett tárolási tag fontos szerepére, súlyára hívtuk fel a figyelmet, illetve arra, hogy a tárolási teret - az eddy kovariancia mérések megbízhatóságának növelése érdekében - szükséges lenne kiterjeszteni valószínűleg a gyökérszóna alá. A talajbeli gradiens módszer alkalmazása különösen az aszály sújtotta ökoszisztémák esetében hozhat fontos - egyébként hozzáférhetetlen információkat. Nagyobb aszályokat megszakító esők után akár napokig tartó (negatív irányú) CO₂ áram alakul ki - ami ezt követően szintén csak napok múltán áramlik vissza és jelentkezik a felszínen, illetve az eddy rendszer mérési magasságában. Ez a negatív előjelű tag nyilván a tárolási tagot erősítene. Csakhogy - gradiens módszer nélkül - nem is tudtunk erről a talajrétegek közötti, az eddy rendszer számára valós időben láthatatlan fluxusról, amelyet a későbbiek során nagy valószínűséggel hibás adatnak vélhettünk - a jobbik esetben. A másik esetben ez az áram szignifikánsan ronthatta az NEE részekre bontását (particionálás), majd az adatpótlás minőségét. Ez utóbbi különösen annak fényében fontos, hogy a bugaci mérőhelyen gyakori az olyan éjszakai időjárási helyzetek kialakulása, amely az eddy kovariancia technikával mért áramok megbízhatóságát rontja. Ezért fontos több - lehetőleg automata - egymástól független mérési eljárás alkalmazása ahhoz, hogy végül megbízhatóbb CO₂-áramokat becsüljünk. Ehhez a talajbeli fluxusok külön történő mérése éppen úgy szükséges lenne, mint az eddy rendszertől szintén független kamrás talajlégzés mérés.

Az egyes ökoфизиologiai folyamatok közötti kapcsolatok leírása mindig is törekvés volt az ökológiában. A talaj- és a gyökérlégzés nettó ökoszisztéma gázcserével, vagy bruttó primer produkcióval mutatott kapcsolata a vegetáció működésének jobb megértése irányába mutat, s részben magyarázatot szolgáltat a (funkcionális) térbeli mintázatok hatástávolságának vízellátottságtól való függésére is, ebben valószínűsítve a gyökerek térbeli integratív szerepét.

A módszertani eredmények közül a talajlégzés mérésére szolgáló több kamrás automata rendszer megépítése, a talajlégzés talajbeli CO₂-koncentráció gradiens révén történő megmérése, illetve ezek és az eddy kovariancia mérések szoros korrelációja - és az egyes módszerek eredményei között tapasztalt ellentmondás - egyaránt kiemelendő. Ezen belül fontos, hogy a kamrás talajlégzésmérő rendszer kalibrált - tehát ennek mérései a többivel történő

összevetésben standard-ként szolgálhatnak. A független eszközök eredményeinek erős korrelációja alkalmazhatóságukat, eltéréseik pedig ezek korlátját mutatja. Az eredmények alapján valószínű, hogy kis durvaságú felszínek feletti gázcsere mérések esetén - a többszörös kényszer elvét alkalmazva - az eddy kovarianciamérések mellett attól független (és azt kényszerítő) kiegészítő mérések szükségesek az adott ökoszisztéma szénmérlegének megbízható méréséhez. Az eddy kovariancia mérések során alkalmazott u^* korrekció esetében például - más mérés híján - általában nem végeztek az eddy méréstől valóban független kontroll-mérést. A gradiens-módszer - a másik talajlégzésmérő rendszerrel való (elsősorban a talaj tortuozitása és nedvességtartalmának változása nyomán fellépő konduktancia-változás miatt szükséges) kalibráció után egy, az időjárás viszontagságaitól függetlenebb és ezért üzembiztosabb alkalmazásként jelenhet meg a jövőben. A fontosabb eredmény azonban talán nem ez, hanem az, hogy - különösen aszály sújtotta ökoszisztémák esetében - valószínűsítettük a talajbeli tárolási tag eddig véltnél jelentősebb szerepét.

A fentiekkel kapcsolatos körvonalazódó dilemma az, hogy az NEE particionálása, illetve a R_{eco} és GPP számítása során a referencia-síkon adott pillanatban áthaladó anyagmennyiséget, vagy az adott pillanatban adott térrészben keletkező/elnyelődő CO_2 -mennyiségeket vegyük-e alapul. Definíciószerűen (és az EK módszerből adódóan) az első megoldás van érvényben, de az implicit módon feltételezi, hogy a - tárolási fluxus szempontjából fontos - doboz modellünk (aminek a teteje a referencia-sík) alja a talajfelszín. Ez utóbbi feltételezés egyre kevésbé állja meg a helyét s jelen munka eredményei is arra utalnak, hogy a modell újragondolása szükséges.

Valószínűnek tűnik, hogy a jövőben az eddy kovariancia módszer eredményeit a talajlégzés (felszíni és vertikális gradiens mentén történő) mérések eredményeivel együtt kell használni ahhoz, hogy a nettó ökoszisztéma gázcserét az eddigiéknél pontosabban meg tudjuk adni. Ez nem csak módszertani változtatás, hanem szemléletbeli változás kérdése is, fő problémaként a $GPP = -NEE + R_{eco}$ - általánosan alkalmazott - kapcsolatot említve. Ennek példáján mutatható be ugyanis az, hogy míg az NEE értéke az EK technikával mérve adott időpillanatra igaz, addig a két másik tag esetében - a talajbeli tárolás (esetenként napokig lefelé is irányuló CO_2 áramlás) eltérő dinamikája miatt - nagy különbségek léphetnek fel adott CO_2 molekula képződésének (R_s) és a mérési síkon való áthaladásának ideje között. Az eredmény az, hogy míg a fotoszintézist tekintve annak adott időpillanatbeli értékét figyelembe veszi az EK mérés a nettó ökoszisztéma gázcserében, a talajlégzést tekintve egy néhány órával (esetleg néhány nappal) korábbi fluxus kerül be az NEE-be. A talajlégzés pedig egyrészt a R_{eco} meghatározó nagyságú része, másrészt erősen függ a hőmérséklettől, nedvességtartalomtól - s a fotoszintézis néhány órával (esetleg nappal) korábbi értékétől. Más szavakkal, a feljebb említett időbeli különbség a CO_2 (talajlégzés során való) képződése és a mérési síkon való áthaladása között várhatóan erősen változékony. Ebből következően a pillanatnyi CO_2 -felvétel értékét vetjük össze egy - pontosabban nem definiálható (illetve vélhetően változó) hosszúságú időszak - CO_2 -leadásával.

Ettől azután - furcsa módon - a mért NEE értékét is némi ambivalenciával szemlélhetjük, mert igaz ugyan hogy adott időpillanatra meg tudjuk mérni az értékét, - de az egy egyelőre nem meghatározható hosszúságú időszak légzési aktivitásait összegzi majd a pillanatnyi felvétel értékével. Az átlagolási idő (amely jelenleg félóra) kiterjesztése egyfelől javíthat a helyzeten, mert növelésével - mondjuk a heti - kumulatív C-mérleg már pontos lehet, ugyanakkor a hiánypótláshoz használt függvényeink (fényintenzitás-függés, hőmérséklet-függés, talajnedvesség-tartalom függés) alaposan "elromolhatnak".

A $GPP_{\text{aktuális}} = -NEE_{\text{aktuális}} + R_{\text{eco, aktuális}}$ helyett valójában a $GPP_{\text{aktuális}} = -NEE_{\text{aktuális}} + R_{\text{eco, korábbi}}$ egyenletet alkalmazzuk, miközben implicit feltételezésünk, hogy abban azonos időben lejátszódó folyamatok szerepelnek. Így például a 12,5 cm-es mélységben (a talajbeli gradiens-mérés középső szenzorának mélysége) lejátszódó légzésből felszabaduló CO₂ a gradiens módszernél ismertett modell szerint hozzávetőlegesen (a talaj nedvességtartalmától és térfogattömegétől is függően) 2,5 óra alatt jut a felszínre, 5 cm mélységből ez az idő egy óra. Tehát - tekintve az időnként előforduló lefelé tartó R_s fluxusokat is -, két esetet kell figyelembe vennünk: *a.* nincs lefelé irányuló R_s, a felszabaduló CO₂ néhány órán belül kijut a felszínre és bekerül a mérlegbe. *b.* van lefelé irányuló R_s, a felszabaduló CO₂ esetleg néhány napos késéssel kerül be a mérlegbe. Ennek egyrészt az a következménye, hogy az adott félórára számított R_{eco} és GPP hibája megnő, másrészt hogy ezeken a hibával terhelt adatokon alapulhat az adatpótlás.

A talajbeli gradiens módszer alkalmazásával módunk nyílik a talajlégzési folyamatok valós időben történő figyelembevételére és ennek a fenti egyenletbe való beépítésére. Ezzel a folyamatok időbeli felbontása elvileg megnövelhető és a $GPP = -NEE + R_{\text{eco}}$ modell alkalmazhatósága javul.

Érdekes, hogy az ökoszisztéma szénmérleget illetően - egy bizonyos feltétel teljesülése mellett - a fentiek nem okoznának problémát. Elég hosszú periódusok fluxusait összeadva ugyanis a relatív hiba nyilván egyre kisebb lenne. A feltétel pedig az, hogy a szénmérleg számításához folyamatos és folyamatosan érvényes adatsorunk legyen. Ez általában nem teljesül. Ha pedig pótolnunk kell a félórás adatainkat, akkor a jelenlegi helyzet szerint ezt nem a megfelelő adatok közötti kapcsolatokra alapozva tesszük meg.

A bevezetőben és az irodalmi áttekintésben az eddy kovarianciát úgy tárgyaltuk, mint a felszín és a légkör között alkalmazható közvetlen árammérési technikát. A fentiekben kimutattuk, hogy ez az áram a CO₂ forgalmat tekintve nem közvetlen, a mikrometeorológiai szempontból védhető mérleg kapcsolata az ökoszisztémában valós időben végbemenő folyamatokkal és a belőlük származtatott mérleggel az eltérő időbeliség miatt nem nyilvánvaló. Ennek hátterében az áll, hogy az EK technika definíció szerint a felszín és a légkör közötti CO₂-forgalmat méri, az ökoszisztémák működése azonban (messze) nem korlátozódik a felszínre, a szénmérleget alkotó folyamatok meghatározó része a felszín feletti folyamatoktól eltérő dinamikát követve a növények felszín alatti részeiben és a talajban megy végbe. Az EK módszerrel valóban meghatározható rövidebb (félórás) időszakokra a *felszín szén(dioxid)-mérlege*, azonban ez a mérleg nem azonos az *ökoszisztémában*

lejátszódó folyamatokból ugyanarra az időszakra számított szénmérleggel. A probléma megoldásához a talajbeli légzési folyamatok több szintben történő mérése, ezáltal az NEE mérési eredmények több oldalról való kényszerítése (szűrése), illetve a model - mérési adat fúzió (mint módszer) használata vezethet el.

MTMT statisztika (2010-02-23-i állapot)

Saját közlemények száma:99 Idézetek száma:656

Független idézetek száma:477 Fügő idézetek száma:156

Összegzett impakt faktor:47,731 Várható IF-ek összege:6,203 Összesen:53,934

Az értekezés témakörében megjelent publikációk:

Impakt faktoros publikációk:

- Gilmanov TG., L. Aires, Z. Barcza, V. S. Baron, L. Belelli, J. Beringer, D. Billesbach, D. Bonal, J. Bradford, E. Ceschia, D. Cook, C. Corradi, A. Frank, D. Gianelle, C. Gimeno, T. Gruenwald, Haiqiang Guo, N. Hanan, L. Haszpra, J. Heilman, A. Jacobs, M. B. Jones, D. A. Johnson, G. Kiely, Shenggong Li, V. Magliulo, E. Moors, Z. Nagy, M. Nasyrov, C. Owensby, K. Pinter, C. Pio, M. Reichstein, M. J. Sanz, R. Scott, J. F. Soussana, P. C. Stoy, T. Svejcar, Z. Tuba, and Guangsheng Zhou (2010): Productivity, Respiration, and Light-Response Parameters of World Grassland and Agroecosystems Derived From Flux-Tower Measurements. *Rangeland Ecology & Management*. 63:16–39. DOI: 10.2111/REM-D-09-00072.1.
- Hidy D, Haszpra L, Barcza Z, Vermeulen A, Tuba Z, Nagy Z (2009): Modelling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica* 47: pp. 457-470. DOI 10.1007/s11099-009-0070-z.
- Nagy, Z. Tuba Z. 2008. Effects of elevated air CO₂ concentration on loess grassland vegetation as investigated in a mini FACE experiment. *Community Ecology*. 9:153-160.
- Pinter, K. Barcza Z. Balogh J. Czobel S. Csintalan Z. Tuba Z. Nagy Z. 2008. Interannual variability of grasslands' carbon balance depends on soil type. *Community Ecology*. 9:43-48.
- Wohlfahrt, G. Anderson-Dunn M. Bahn M. Balzarolo M. Berninger F. Campbell C. Carrara A. Cescatti A. Christensen T. Dore S. Eugster W. Friborg T. Furger M. Gianelle D. Gimeno C. Hargreaves K. Hari P. Haslwanter A. Johansson T. Marcolla B. Milford C. Nagy Z. Nemitz E. 2008. Biotic, Abiotic, and Management Controls on the Net Ecosystem CO₂ Exchange of European Mountain Grassland Ecosystems. *Ecosystems*. 11:1338-1351.
- Nadas, E. Balogh A. Kiss F. Szenté K. Nagy Z. Martinez-Carrasco R. Tuba Z. 2008. Role of fructose-1,6-bisphosphatase, fructose phosphotransferase, and phosphofructokinase in saccharide metabolism of four C3 grassland species under elevated CO₂. *Photosynthetica*. 46:255-261.
- Foti, S. Balogh J. Nagy Z. Urmos Z. Bartha S. Tuba Z. 2008. Temporal and spatial variability and pattern of soil respiration in loess grassland. *Community Ecology*. 9:57-64.
- Nagy, Z. Pinter K. Czobel S. Balogh J. Horvath L. Foti S. Barcza Z. Weidinger T. Csintalan Z. Dinh N. Q. Grosz B. Tuba Z. 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 121:21-29.
- Soussana, J. F. Allard V. Pilegaard K. Ambus P. Amman C. Campbell C. Ceschia E. Clifton-Brown J. Czobel S. Domingues R. Flechard C. Fuhrer J. Hensen A. Horvath L. Jones M. Kasper G. Martin C. Nagy Z. Neftel A. Raschi A. Baronti S. Rees R. M. Skiba U. Stefani P. Man 2007. Full accounting of the greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 121:121-134.

- Balogh, J. Nagy Z. Foti S. Pinter K. Czobel S. Peli E. R. Acosta M. Marek M. V. Csintalan Z. Tuba Z. 2007. Comparison of CO₂ and H₂O fluxes over grassland vegetations measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber. *Photosynthetica*. **45**:288-292.
- Gilmanov, T. G. Soussana J. E. Aires L. Allard V. Ammann C. Balzarolo M. Barcza Z. Bernhofer C. Campbell C. L. Cernusca A. Cescatti A. Clifton-Brown J. Dirks B. O. M. Dore S. Eugster W. Fuhrer J. Gimeno C. Gruenwald T. Haszpra L. Hensen A. Ibrom A. Jacobs A. F. G. Jones M. B. Lanigan G. Laurila T. Lohila A. Manca G. Marcolla B. Nagy Z. Pilegaard K. Pinter K. Pio C. Raschi A. Rogiers N. Sanz M. J. Stefani P. Sutton M. Tuba Z. Valentini R. Williams M. L. Wohlfahrt G. 2007. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*. **121**:93-120.
- Hagyó, A. Rajkai M. Nagy Z. 2006. Effect of forest and grassland vegetation on soil hydrology in Matra Mountains (Hungary). *Biologia*. **61**:261-S265.
- Szente, K. Nagy Z. Tuba Z. 1998. Enhanced water use efficiency in dry loess grassland species grown at elevated air CO₂ concentration. *Photosynthetica*. **35**:637-640.
- Tuba, Z. Jones M. B. Szente K. Nagy Z. Garvey L. Baxter R. 1998. Some ecophysiological and production responses of grasslands to long-term elevated CO₂ under continental and atlantic climates. *Stress of Life - From Molecules to Man*. **851**:241-250.
- Tuba, Z. Szente K. Nagy Z. Csintalan Z. Koch J. 1996. Responses of CO₂ assimilation, transpiration and water use efficiency to long-term elevated CO₂ in perennial C-3 xeric loess steppe species. *Journal of Plant Physiology*. **148**:356-361.

Nem IF-os szakcikkek:

- Horváth L, Grosz B, Czóbel Sz, Nagy Z, Péli E R, Szerdahelyi T, Szirmai O, Tuba Z. 2008. Measurement of methane and nitrous oxide fluxes in Bodrogek, Hungary; preliminary results. *Acta Biologica Szegediensis* (ISSN: 1588-385X) 52:(1) pp. 119-122.
- Nagy Z, Szente K, Tuba Z. 2007. Gyepvegetáció akklimatizációja emelt légköri szén-dioxid-koncentrációhoz: hosszú időtartamú kísérletek eredményei. *Magyar Tudomány* 10: 1258-1265.
- Pintér K, Nagy Z, Balogh J, Barcza Z, Kristóf D, Weidinger T, Grosz B, Machon A, Horváth L, Tuba Z 2007. A tájléptékű szén- és nitrogénmérleg összetevői, mikrometeorológiai mérése. In.: Weidinger T and Geresdi I.: *Légkörfizika és mikrometeorológia*, p.: 161-169. , Országos Meteorológiai Szolgálat, ISBN 978-963-7702-97-6.
- Pintér K, Nagy Z, Barcza Z, Balogh J, Czóbel Sz, Fóti Sz, Weidinger T, Tuba Z. 2007. Az ökoszisztéma-léptékű fotoszintetikus CO₂-asszimiláció és légzés sajátosságai a mérsékelt övi gyepekben. *Magyar Tudomány* 10: 1280-1287.
- Kristof, D. Neidert D. Nagy Z. Pinter K. 2007. Integrating MODIS surface reflectance products into the processing of medium and high-resolution satellite images: Difficulties and solutions through two Hungarian case studies. 2007 International Workshop On the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. 151-156.
- Kristof, D. Pataki R. Neidert D. Nagy Z. Pinter K. 2007. Integrating temporal and spectral information from low-resolution MODIS and high-resolution optical satellite images: two Hungarian case studies - art. no. 67420J. *Remote Sensing For Agriculture, Ecosystems, and Hydrology* 1x. **6742**:J7420-J7420.
- Fóti Sz, Balogh J, Nagy Z, Czobel Sz, Bartha S, Tuba Z. 2007. Mérsékelt övi gyepek közösségei CO₂-gázcserejének kisléptékű térbeli variabilitása és mintázata. *Magyar Tudomány* 10: 1266-1272.
- Nagy Z, Czóbel Sz, Balogh J, Horváth L, Pintér K, Weidinger T, Csintalan Zs, Tuba Z. 2005. Carbon balance of Hungarian grasslands in years with contrasting weather conditions. *Acta Biologica Szegediensis* 49:131-132.
- Gilmanov T, Soussana J F, Amman C, Fuhrer J, Clifton-Brown J, Jones M, Tuba Z, Nagy Z, Horváth L 2005. Partitioning of the tower-based net CO₂ exchange measurements in

- European grasslands into gross primary productivity and ecosystem respiration components using light-response functions analysis. In: Soussana, J.F. (ed.): *Greengrass, Sources and skins of greenhouse gases from managed European grasslands and mitigation strategies*, Final Project Report, p.: 54-59.
- Jones S, Rees R M, Skiba U, Tuba Z, Czobel Sz, Nagy Z, Balogh J, Sutton M 2005. Emission of N₂O as affected by N supply, irrigation and N forms in small grassland plots. In: Soussana, J.F. (ed.): *Greengrass, Sources and skins of greenhouse gases from managed European grasslands and mitigation strategies*, Final Project Report, p.: 78-83.
- Allard V, Soussana J F, Ambus P, Cambell C, Clifton-Brown J, Czobel Sz, Domingues R, Flechard C, Fuhrer J, Hensen A, Horvath L, Jones M, Kasper G, Martin C, Nagy Z, Neftel A, Pilegaard K, Raschi A, Baronti S, Rees RM, Skiba U, Stefani P, Manca G, Sutton M, Tuba Z. 2005. Assessing the greenhouse gas balance of the GreenGrass network of sites. In: Soussana, J.F. (ed.): *Greengrass, Sources and skins of greenhouse gases from managed European grasslands and mitigation strategies*, Final Project Report, p.: 60-65.
- Balogh J, Fóti Sz, Nagy Z, Czóbel Sz, Pintér K, Péli E, Tuba Z. 2005. Comparison of carbon dioxide fluxes over sandy grasslands vegetation as measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber. *Acta Biologica Szegediensis* (ISSN: 1588-385X) 49: pp. 143-147. (2005)
- Tuba Z, Nagy Z, Czóbel Sz, Balogh J, Csintalan Zs, Fóti Sz, Juhász A, Péli E, Szente K, Palicz G, Horváth L, Weidinger T, Pintér K, Virágh K, Nagy J, Szerdahelyi T, Engloner A, Szirmai O, Bartha S. 2004. Hazai gyepársulások funkcionális ökológiai válszai, C-körforgalma és üvegházhatású gázainak mérlege jelenlegi és jövőbeni várható éghajlati viszonyok, illetve eltérő használati módok mellett. *AGRO 21 Füzetek*, 37: 123-138.
- Nagy Z, Tuba Z, Czóbel Sz, Engloner A, Palicz G, Benkő Zs. 2002. Ecophysiological responses by loess grassland vegetation to elevated air CO₂ concentration in a miniFACE system. *Acta Biol. Szeged.* 46: 215-217.
- Balogh J, Czóbel Sz, Juhász A, Fóti Sz, Nagy Z, Tuba Z. 2002. Seasonal Carbon-balance of a semi-desert temperate grassland ecosystem over a year period. *Acta Biologica Szegediensis* 46:221-222.
- Tuba Z, Jones MB, Szente K, Nagy Z, Garvey L, Baxter R. 1998. Some ecophysiological and production responses of grasslands to long-term elevated CO₂ under continental and atlantic climates. *Annals of The New York Academy of Sciences* (ISSN: 0077-8923) 851: 241-250.
- Nádas E, Balogh Á, Kiss F, Nagy Z, Szente K, Tuba Z. 1997. Some aspects of carbohydrate metabolism in two C3 grassland species under elevated CO₂. *Abstracta Botanica* 21: pp. 323-328.
- Nagy Z, Raschi A, Jones MB, Tuba Z. 1997. Elevated atmospheric CO₂ and grasslands a brief overview. *Abstracta Botanica* 21: 329-335.
- Nagy Z, Szente K, Tuba Z. 1997. Acclimation of dicot and monocot temperate species to long-term elevated CO₂ concentration. *Abstracta Botanica* 21: 329-336.
- Tuba Z, Szente K, Nagy Z, Csintalan Zs, Koch J, Kemény G, Laitat E, Masarovicová E, Takács Z. 1993. The response of Hungarian loess grassland species to long-term elevated CO₂ (Ecophysiological responses to the first 9,5 months exposure). *Hungarian Agricultural Research* 2: 37-40.