

AZ ÖKOSZISZTÉMA-LÉPTÉKŰ FOTOSZINTETIKUS CO₂-ASSZIMILÁCIÓ ÉS LÉGZÉS SAJÁTOSÁGAI MÉRSÉKELT ÖVI GYEPEKBEN

Pintér Krisztina

PhD-hallgató, tanszéki mérnök
SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet
pinter.krisztina@mkk.szie.hu

Barcza Zoltán

PhD, egyetemi adjunktus
ELTE Meteorológiai Tanszék

Czóbel Szilárd

PhD-hallgató, egyetemi adjunktus
SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

Weidinger Tamás

PhD, egyetemi docens
ELTE Meteorológiai Tanszék

Nagy Zoltán

kandidátus, PhD, habil. egyetemi docens
SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

Balogh János

PhD-hallgató, tudományos segédmunkatárs
MTA-SZIE Növényökológiai Kutatócsoport

Fóti Szilvia

PhD-hallgató, tanszéki mérnök
SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

Tuba Zoltán

DSc, mb. intézetigazgató, egyetemi tanár
SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet,
MTA-SZIE Növényökológiai Kutatócsoport

Bevezetés

A szünfiziológia a különböző növényközösségek és ökoszisztémák fotoszintetikus folyamataival és C-metabolizmusának vizsgálatával foglalkozó tudományág. Ilyen térléptékben már nem alkalmazható a levélszinten használt kamrás mérési technika. A jelenlegi technikai feltételek mellett a kiterjeszhetőség felső határa Balogh János és munkatársai (2005), illetve Czóbel Szilárd és munkatársai (2005) vizsgálatai alapján méteres nagyságrendű. A makrotérléptékű, pár száz métertől akár több kilométeresig terjedő térléptékű fiziológiai működés vizsgálatához más tudományágak mód-

szereit kell használni. Ilyen eljárás például a mikrometeorológiából kölcsönzött eddy- (vagy örvény-) kovariancia módszer, mellyel a vízgőz, hő, szén-dioxid és egyéb nyomgázok (például: ózon, nitrogén-oxidok, metán) a társulás és a légtér határán történő turbulens kicserélődésének a hosszú időtartamon keresztüli mérése valósítható meg.

Az eddy-kovariancia módszer az ökológiai kutatásokban most kezd igazán elterjedni. Kutatócsoportunk még 2002-ben létrehozta hazánkban az első ökoszisztéma-léptékű eddy- (vagy örvény-) kovariancia kutatóállomást (helyszíne Bugacpuszta), majd 2003-ban, a

Mátrában (Szurdokpüspöki) működtetni kezdtük második ilyen kutatóállomásunkat. Kelet-Európában gyepfelszínekről még napjainkban is csak ezen két állomásról származó szén-dioxid-mérleg adatsorok állnak rendelkezésre, melyek egyértelműen jelzik ezen kutatóállomások egész földrajzi térségbeli jelentőségét (Soussana *et al.*, 2007).

Munkánkban először az eddy-kovariancia módszer elméleti alapjait ismertetjük, majd röviden bemutatjuk a két mérőhelyet, végül pedig méréseink eredményei közül ismertünk néhányat.

Elméleti alapok

A felszín és a légkör közötti vertikális (függőleges) irányú kicserélődés különböző méretű örvények közreműködésével zajlik. A szélmező nagy időbeli felbontású mérésével nyerhetünk információt ezen örvények viselkedéséről. Ha megrajzoljuk egy nyári délutánra a 10 Hz-es szélmérés eredményét, akkor egy – az első pillantásra kaotikusnak tűnő – képet kapunk (*1. ábra*). Ám ha alaposabban megnézzük az ábrát, feltűnik benne némi rendszeresség. Először is a szélesség nem véletlenszerű határok között változik, hanem csak egy jól meghatározott tartományban vesz fel értékeket. Ha kiszámoljuk például a félórás átlagokat, akkor egyértelmű csökkenő tendenciát kapunk, ami a szélesség napi menetét mutatja. A pillanatnyi szélességérték átlagtól való eltérése (fluktuációja) is mutat napi menetet, ebből pedig az következik, a szélesség változékonysága (szórása) alkalmas a turbulencia erősségének a számszerűsítésére. Felfedezhető továbbá az is, hogy a szélső értékek többféle időskálán fordulnak elő (1 perc, 5 perc, fél óra). Ez a tulajdonság azt bizonyítja, hogy a légkörben a mozgások és kicserélődési folyamatok több különböző méretű ör-

vény szuperpozíciójaként jönnek létre. Az örvények mérete és életideje között szoros kapcsolat áll fenn, a nagy örvények hosszabb ideig maradnak meg a légkörben, míg a kisebbek rövidebb ideig élnek (Stull, 1988).

Említettük, hogy a szélességszórás jól jellemzi a turbulencia erősségét. A vertikális szélesség és egy adott tulajdonság (pl. hőmérséklet, vízgőz vagy szén-dioxid-koncentráció) szorzatának szórását (kovarianciáját) kiszámolva megkapjuk az adott tulajdonság turbulens áramát. A vertikális szélesség hőmérséklettel vett kovarianciája adja a szenzibilis hőáramot, a vízgőz-koncentrációval számított kovarianciája a látens hőáramot, valamint szén-dioxid-koncentrációval vett kovariancia adja a szén-dioxid-áramot. A módszer előnye, hogy mostanra már hosszú távú, folyamatos méréseket tesz lehetővé napi 24 órában félórás vagy órás bontásban, az év minden napján. Ezzel szemben a hátránya, hogy csak a fotoszintézis és a respiráció eredőjét, a nettó ökoszisztéma- (szén-dioxid) kicserélődést (NEE – Net Ecosystem Exchange) képes közvetlenül mérni (Aubinet *et al.*, 2000). A mérőrendszer magasságától függően egy 600–1000 méter átmérőjű gyepökoszisztéma (vagy más vegetációval borított) terület egészének méri folyamatosan a nettó szén-dioxid-kicserélődését.

Mérőhelyek

A Szent István Egyetem Növényteni és Ökofiziológiai Intézetének kezelésében hazánkban két helyen zajlik gyepfelszínek szén-cseréjének mérése. Bugacpusztán (46.69°N, 19.60°E, 113 m tszf.), a Kiskunsági Nemzeti Parkban, a környéken az éves átlaghőmérséklet: 10,4°C, éves csapadékösszeg: 562 mm. A területen a humuszos, mélyben szikes homoktalaj a jellemző, a talajvíztartalom általában 5–25 térfogat % között változik. A gyepfelszínt a *Festuca*

ca pseudovina, *Achillea collina* növényfajok jellemzik. Második mérőállomásunkat a Mát-ra nyugati részére, Szurdokpüspöki település közelébe (47.85° N, 19.73° E, 300 m tszf.) telepítettük. A térségben az alfölditől kissé eltérő klimatikus viszonyok uralkodnak, az éves középhőmérséklet 10,2 °C, az éves csapadék-összeg pedig 622 mm. Az 50 %-os agyagtartalmú barna erdőtalajon kialakult gyeperő alkotója a *Festuca rupicola*, a talaj víztartalma 18–44 térfogat % között mozog.

Mérések

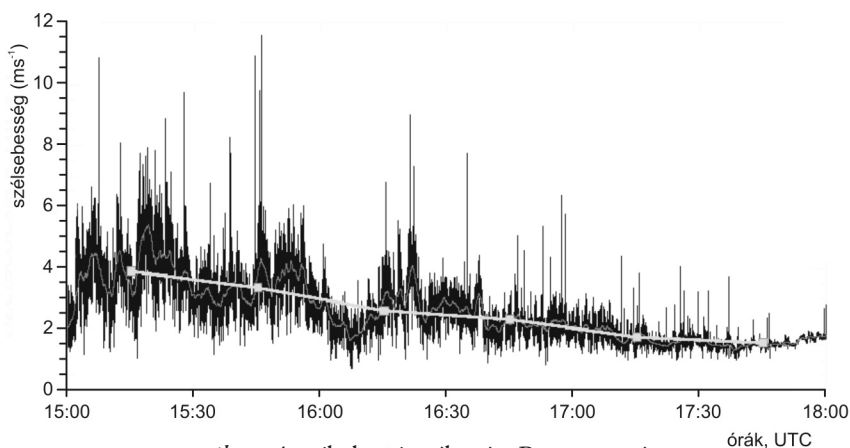
Mindkét mérőhelyen félórás átlagolási idővel mérjük a környezeti tényezőket, így a hőmérsékletet, a relatív nedvességet, a csapadékot, a szélsébséget, a szélirányt, a globálsugárzást, a sugárzási egyenleget, a fotoszintetikusan aktív sugárzást (PAR), a talajhőmérsékletet. Az eddy-kovariancia módszerhez szükséges 10 Hz-es szélsébség méréseket egy CSAT3-as szónikus anemométerrel valósítjuk meg. A vízgőz és a szén-dioxid koncentrációjának nagyfrekvenciás mérése egy Li-Cor 7500-as infravörös gázanalizátorral történik. Ezzel a módszerrel nemcsak a szén-dioxid turbulens

fluxusát, hanem az energiamérleg két fő komponensét, a szenzibilis és a látens hőáramot is meghatározhatjuk. A mérőrendszer a mérési magasságtól és a horizontális szélsébségtől függő nagyságú forrásterületen elhelyezkedő növényegyedek együttes szén-dioxid-cseréjét méri. Ennek a területnek a meghatározása az ún. *footprint* (magyarul: forrásterület) analízis segítségével történik.

EREDMÉNYEK

Meteorológiai viszonyok a két mérőhelyen

Méréseink alapján elmondható, hogy Bugacon 2002-ben a nyár az átlagosnál melegebb és szárazabb volt. A 2003-as éves átlaghőmérséklet (9,7 °C) ugyan alacsonyabb volt a tízéves átlagnál (10,4 °C), de ennek fő oka az átlagnál jóval alacsonyabb februári átlaghőmérséklet, hiszen a nyári hónapok átlaghőmérséklete (22,3 °C) jóval meghaladta a tízéves átlagot (20,3 °C). 2004-ben az éves átlaghőmérséklet 10 °C volt, ami kevéssel alacsonyabb a tízéves átlagnál, a napi átlaghőmérsékletek nyáron jól láthatóan az előző évi alatt voltak. A 2003-as extrém szárazság miatt a talaj nedvességtartalma május közepére 10 % alá csök-



1. ábra • A szélsébség változása Bugacpusztán 2005. augusztus 9-én délután, 10 Hz-es felbontásban

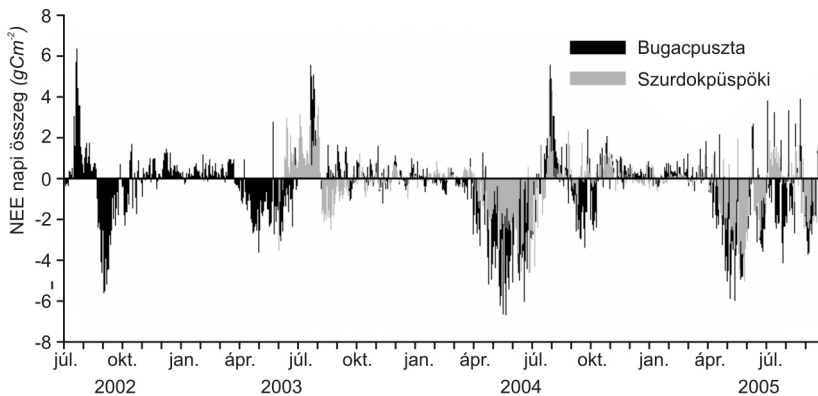
kent, és jelentős utánpótlás nem is történt október közepéig. A többi vizsgált évben a nyár folyamán többször is jelentősen emelkedett a talajnedvesség szintje.

A Mátrából 2003 júniusától állnak rendelkezésre adatok, a nyári hónapok átlaghőmérséklete (22 °C) itt is magasabb volt a tízéves átlagnál (20,5 °C). 2004-ben az éves átlaghőmérséklet megegyezett a tízéves átlaggal, de a nyár enyhébb (19,8 °C), és az ősz (11 °C) kissé melegebb volt a tízéves átlagnál (nyár: 20,5 °C, ősz: 10,3 °C). 2005-ben a tavaszi átlaghőmérséklet (10,8 °C) csak 0,1 °C-kal volt alacsonyabb a tízéves átlagnál, de nyáron már -0,6 °C volt a különbség. A mátrai talajnedvességértékek sokkal kisebb változékonyságot mutatnak, mint a bugaciak, ennek oka a két mérőhely talajviszonyaiban keresendő. A bugaci homoktalaj kis mennyiségű csapadékot is fel tud venni, és könnyebben is szárad ki, míg a mátrai agyagos talaj nehezebben veszi fel a csapadékot, és nehezebben is szárad ki.

A két mérőhely klimatikus viszonyait összehasonlítva általában elmondható, hogy a Mátrában az Alföldhöz képest hűvösebb van, és több csapadék hullik

A bugaci és mátrai ökoszisztémák szén-cseréjének napi összegei

Az állományszintű (ökoszisztémaszintű) széndioxid-gázcsere mérések gyakorlatában, a biológusok által használt terminussal ellentétben a negatív értékek jelentik az ökoszisztéma általi – általában nappali – szén-dioxid-felvételt (a légkör szempontjából veszteség), és a pozitív értékek a légzési folyamatokból származó – általában éjjel jellemző – szén-dioxid-leadást. A mérőrendszer által szolgáltatott félórás értékeket hosszabb időszakra (pl. nap, hónap vagy év) összegezve megkapjuk a nettó ökoszisztéma-gázcsere (NEE, $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ időmértékegység}^{-1}$) értékét, ami azt mutatja, hogy az adott ökoszisztéma az adott időszakra nézve nettó nyelő (negatív összeg) vagy nettó forrás (pozitív összeg) volt-e. Normális esetben nyáron a fotoszintézis dominál, és negatív napi összegeket mérünk. Száraz és csapadékszegény nyarakon azonban a növényzet kiszáradásának köszönhetően a respiráció kerül túlsúlyba, és pozitívak lesznek az ökoszisztéma nettó gázcseréjének (NEE) napi összegei.

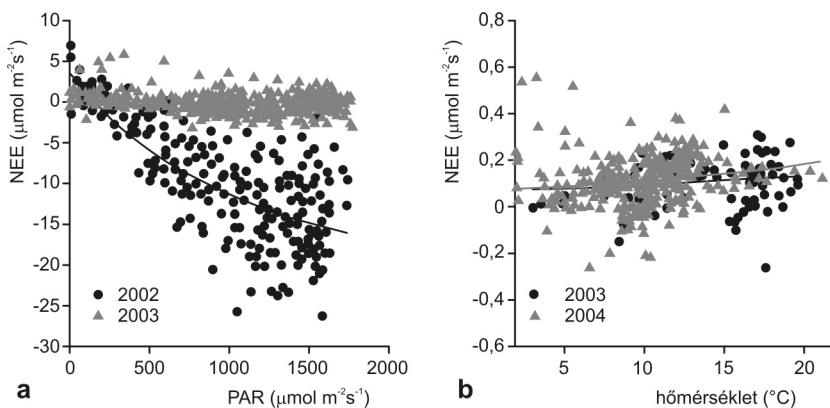


2. ábra • Az ökoszisztéma nettó szén-cseréjének napi összege Bugacpusztán és Szurdokpüspökiben 2002 júliusa és 2005 szeptembere között

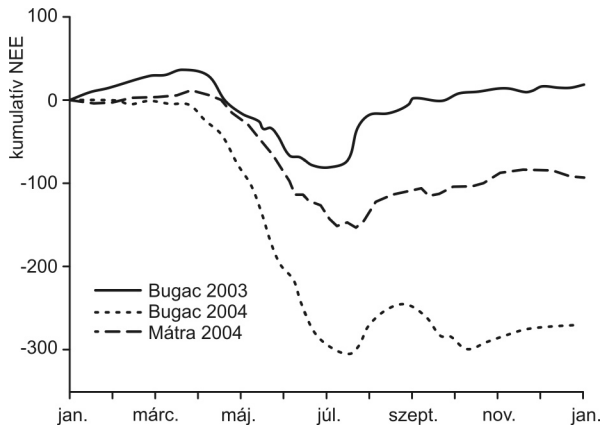
A bugaci és mátrai gyepfelszín nettó szén-cseréjének napi összegeit a 2. ábra szemlélteti. Általában március közepétől október közepéig a fűfelszínnek szén-dioxid-cseréjének napi összegei negatívak, tehát szén-dioxidot vesznek fel a légkörből. A szén-dioxid-megkötés intenzitása évek közti változékonyságot mutat. 2003-ban, az extrém meleg és száraz évben a növényzet napi szinten feleannyi szén-dioxidot vett fel, mint a többi vizsgált évben. A mátrai gyep a bugacinál kisebb mennyiségű szén-dioxidot vesz fel, annak ellenére, hogy a csapadékviszonyok a mátrai mérőhely esetében a kedvezőbbek. A bugaci és mátrai ökoszisztémák viselkedése közötti másik legnagyobb különbség a nyár közepén történő kiszáradás, valamint az azt követő regeneráció megléte vagy elmaradása. Ezen folyamatokat az átlaghőmérsékleten és a lehullott csapadék mennyiségén kívül a mérőhelyek talajviszonyai és a vegetációt alkotó gypfajok szárazságtűrése is befolyásolja. A bugaci homokos talajon már kevesebb csapadék is jelentősen növeli a növényzet számára felvehető vízkészletet, míg a mátrai agyagos talajon ehhez

ennél lényegesen nagyobb mennyiségű csapadékra van szükség. Ennek tulajdonítható, hogy 2003-ban a mátrai gyep estében tapasztaltunk őszi növekedést, 2004-ben a bugaci vegetáció mutatott erősebb őszi regenerációt, valamint hogy 2005-ben Bugacon nem is történt meg a növényzet kiszáradása, így a szénfelvétel a nyár és kora ősz során folyamatos volt, míg a Mátrában ezen a nyáron is kiszáradt a növényzet. Szintén ehhez a kérdéskörhöz köthető az a jelenség, hogy csapadékhullás után megnő a respiráció, aminek következtében akár a legintenzívebb szénfelvételi időszak közepén is előfordulhat, hogy egyes napok nettó szénmérlege pozitív lesz, vagyis jelentős mennyiségű szénleadás történik. Ezt a folyamatot mindkét ökoszisztéma esetében megfigyelhetjük.

A növényzet viselkedése tovább jellemezhető az NEE és a PAR (nappal), valamint az NEE és a hőmérséklet (éjszaka) közötti összefüggések vizsgálatával. Az NEE és PAR közötti kapcsolatot 2002 és 2003 augusztusának második felére hasonlítjuk össze (3a. ábra). Az első évben a növényzet vízellátottsága op-



3. ábra • a.) A fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) és az NEE kapcsolata 2002. és 2003. augusztus második felében; b.) A hőmérséklet és az NEE kapcsolata 2003 és 2004 májusának második felében



4. ábra • Az NEE kumulatív összege az Alföldön és a Mátrában

tímális volt, így a szokásos hiperbolikus függvény jól illeszthető az adatokra. Ezzel szemben 2003-ban a növényzet augusztusra már kiszáradt, nem mutatott fotoszintetikus aktivitást, így nincs szignifikáns kapcsolat a két változó között. A hőmérséklet és az NEE között általában exponenciális a kapcsolat, a 2003 és 2004 májusában érvényes függvényeket a 3b. ábra hasonlítja össze. Itt is megfigyelhető a szárazság hatása, hiszen 2003-ban a kiszáradt gyepek éjszakai légzése sokkal gyengébb, mint a következő, jó vízellátottságú évben.

A két gyeppfelszín éves (2004) szénfelvételeinek összehasonlítását a 4. ábra szemlélteti. A két mérőhely kumulatív szénmérlegében az első szembevetendő különbség, hogy a téli hónapokban a hegyvidéki gyeppfelszín szenet adott le, míg az alföldi szénmérleg napi szinten nulla körül mozgott, de inkább kissé negatív volt. Április elején mindkét mérőhelyen megkezdődött a vegetáció aktív növekedési periódusa, jelentős szénmegkötés történt, majd a növekedési időszak végére (július eleje) a bugaci gyeppfelszín már több mint kétszer annyi szenet vett fel, mint a mátrai. Ez az arány a két ökoszisztéma szénfelvétele között az év végére a bugaci őszi növekedési periódusnak

köszönhetően megváltozott, és a bugaci gyepek éves NEE összege -188 gC m^{-2} (Nagy *et al.*, 2007), míg a mátrai fűfelszíné -35 gC m^{-2} lett.

Bugacpusztai méréseink alapján lehetőség nyílik a két, eltérő meteorológiai viszonyokkal jellemezhető év szénmérlegének összehasonlítására (4. ábra). Az évek közötti legjelentősebb különbség az éves csapadék mennyiségében keresendő, hiszen 2003-ban Bugacon a tízéves átlagnál 140 mm-rel kevesebb csapadékot mértünk, míg 2004-ben 55 mm-rel többet. Ezen viszonyoknak köszönhetően a bugaci gyeppfelszín szénfelvétele 2003-ban $+80 \text{ gC m}^{-2}$ volt, míg 2004 -188 gC m^{-2} .

Összehasonlításképpen különböző földrajzi helyeken (zömében Észak-Amerikában) elhelyezkedő, különböző fajösszetételű gyepek (főleg C₄-es és vegyes, magasfüvű) szénmérlege -274 és $-18 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ között alakult (Li *et al.*, 2005). A csapadékszegény időjárás más ökoszisztémák esetén is hasonló hatással bír. Lawrence B. Flanagan és munkatársai (2002) Kanadában mérsékelt övi gyeptársulás felett folytatott eddy-kovariancia mérései alapján az 1999-es csapadékosabb év szénmérlege -21 gC m^{-2} volt (szénfelvétel), míg az azt követő csapadékszegényebb és melegebb

évben éves szinten 18 gC m^{-2} szénleadás történt. Jelen esetben az éves szén-csere mértékét nagyban befolyásolja, hogy a mérések helyén a havi középhőmérsékletek $3\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal elmaradnak a nálunk mérhetőtől, köszönhetően annak, hogy a mérőhely északabbra található, mint a miénk. Mediterrán területeken szintén előfordult, hogy a csapadékhiány miatt a gyepek éves szinten forrás lett. Egy kaliforniai gyeptársulás éves szénmérlege -132 gC m^{-2} , illetve 29 gC m^{-2} volt, a csapadék évközi eloszlásának függvényében (Xu – Baldocchi, 2004). Mérőhelyünkkel közel azonos földrajzi szélességen, a mongol sztyeppén történtek Sheng-Gong Li és munkatársai (2005) vizsgálatai, a 2003 és 2004 márciusa között folytatott mérések azt mutatták, hogy a sztyeppe éves szénmérlege -41 gC m^{-2} volt. A bugacpusztai gyepek klimatikus viszonyait és növényzetét tekintve összevethető a fenti gyepek ökoszisztémáinak adataival. A 2003-as évben tapasztalt jelentős mértékű C-leadás az adott év időjárása miatt extrémnek tekinthető, míg 2004 az átlagoshoz hasonlóbb időjárású – általában jellemzőbb – év volt.

Összefoglalás

A különböző léptékekben és ökoszisztémák felett folytatott szén-dioxid-gázcsere mérések döntő jelentőségűek a globális szénmérleg meghatározása szempontjából. Az eddy-kovariancia módszerrel történő kicserélődés-

mérések lehetőséget nyújtanak a szezonális, illetve éves szénmérleg tájleptékű megismeréséhez. A hosszú távon folytatott mérések alkalmat adnak a szénmérleg klimatikus viszonyoktól való függésének meghatározására. Méréseink alapján kijelenthetjük, hogy az éves csapadékösszeg és annak évközi eloszlása jelentős hatást gyakorol a gyepevegetációk működésének éves menetére és végső soron szénmérlegére, hiszen a 2003-as aszályos évben a bugaci terület gyenge forrásként viselkedett, amíg az átlagnál kicsivel csapadékosabb évben jelentős mennyiségű szénet kötött meg. A globális éghajlatváltozás hatására térségünkben a hőmérséklet emelkedése és a csapadékmennyiség csökkenése várható (Bartholy et al., 2005). A melegedés és szárazodás mértékétől, valamint a gyepek felszínének stressztoleranciájától függően a gyepek egy része nettó szén-dioxid-nyelőből forrássá válhat, akár hosszú távon is.

Jelen kutatásokat a GreenGrass (EU Framework 5 project), a Carbomont (EU Framework 5 project), valamint a Carboeurope IP (EU 6 Framework project), továbbá a KLÍMAKKT (NKH) és GVOP kutatási programok támogatták, illetve támogatják.

Kulcsszavak: felszín-légkör kicserélődés, eddy-kovariancia mérések, nettó ökoszisztéma szén-csere, csapadékszegény időjárás

IRODALOM

- Aubinet, Marc – Grelle, A. – Ibrom, A. *et al.* (2000) Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology. *Advances in Ecological Research*. 30, 113–175.
- Balogh János – Fóti Sz. – Juhász A. *et al.*, (2005): Seasonal CO_2 -Exchange Variations of Temperate Semi-Desert Grassland in Hungary. *Photosynthetica*. 43, 2, 107–110.

- Bartholy Judit – Mika J. – Pongrácz R. *et al.*, (2005) A globális felmelegedés éghajlati sajátosságai a Kárpát-medencében. In: Takács-Sántha András (szerk.): *Éghajlatváltozás a világban és Magyarországon*. Alinea-Védegyelet, Budapest
- Czóbel Szilárd – Fóti Sz. – Balogh J. *et al.* (2005): Chamber Series and Space-scale Analysis in Grassland Vegetation. A Novel Approach. *Photosynthetica*. 43, 2, 267–272.

- Flanagan, Lawrence 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 Biology*. 8, 7, 599–615.
- Li, Sheng-Gong – Asanuma, J. – Eugster, W. et al. (2005): Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange over Grazed Steppe in Central Mongolia. *Global Change Biology*. 11, 1941–1955.
- Nagy Zoltán – Pintér K. – Czóbel Sz. *et al.* (2007): The Carbon Budget of a Semiarid Grassland in a Wet and a Dry Year in Hungary. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 121, 21–29.
- Soussana, Jean-Francois – Allard, V. – Pilegaard, K. et al. (2007): **Full Accounting of the Greenhouse Gas (CO₂, N₂O, CH₄) Budget of Nine European Grassland Sites**. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 121, 121–134.
- Stull, Roland B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht
- Xu, Liukang – Baldocchi, Dennis D. (2004): Seasonal Variation in Carbon Dioxide Exchange over a Mediterranean Annual Grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*. 123, 1–2, 79–96.

