

PROSTOROVĚ ČASOVÁ DISTRIBUCE KONCENTRACÍ CO₂ V PŮDĚ KRASOVÉHO ZÁVRTU A JEHO OKOLÍ (HARBEŠSKÁ PLOŠINA; MORAVSKÝ KRAS)

Spatiotemporal distribution of CO₂ concentrations in the soils of karst sinkhole and its vicinity (Harbechy Plateau; Moravian Karst)

Martin Blecha^{1,2}, Jiří Faimon¹

¹ Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Masarykova universita, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: faimon@sci.muni.cz

² Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i. (VÚMOP, v. v. i.), Žabovřeská 250, 256 27 Praha 5 – Zbraslav

(24-41 Vyškov)

Key words: Sinkhole, Společňák, Harbechy Plateau, CO₂ concentration

Abstract

Soil CO₂ is an important part of the global carbon cycle. In karst, it controls fundamental processes as limestone dissolution and calcite speleothem growth. A spatiotemporal distribution of soil CO₂ concentrations was studied at the site of Společňák sinkhole and its close vicinity (Harbechy Plateau, Moravian Karst). The aim of the study was testing an effect of subterranean ventilation of the CO₂ concentrations in soil profile. At this site, 25 soil boreholes were drilled: each 2 cm in diameter and 60 cm deep. A central drill-hole was situated at the bottom of the sinkhole. Six identical drill-holes, six meters of each other, were in the direction of NE, SW, NW, and SE. As result, 3 drill-holes were placed in sinkhole body and 3 drill-holes outside in the field in every direction. CO₂ concentrations were measured directly in the atmosphere of soil drill-holes at a depth of about 10 cm below the surface. Soils were identified as haplic Luvisols. The found CO₂ concentrations varied spatially and temporally between 1 188 ppmv and 6 039 ppmv. Statistical analysis showed that the differences between CO₂ concentrations in sinkhole and its vicinity are not significant at $\alpha = 0.05$. The only exception from these results seems to be inconclusive. The differences between the sinkhole CO₂ concentrations in summer and winter were found also insignificant. Therefore, we have concluded that the study did not confirm any impact of subterranean ventilation on soil CO₂. However, for a definitive confirmation or rejection of the hypotheses about subterranean ventilation, it is needed more comprehensive survey under tighter spatial and temporal sampling at multiple locations.

Úvod

Oxid uhličitý je klíčovou komponentou v uhlíkovém cyklu (Ridgwell – Zeebe 2005). Půdní respirace je nejvýznamnějším zdrojem atmosférického CO₂ ze všech terestrických ekosystémů. Např. Schlesinger – Andrews (2000) odhadují, že globální toky CO₂ z půd do atmosféry odpovídají ~ 75 Gtun C rok⁻¹. Přitom současné antropogenní emise jsou cca 8× nižší (~ 9,7 Gtun C rok⁻¹). V karbonátových krasových systémech, zahrnujících cca 10,4 % suchozemské plochy Země (Dürr et al. 2005), je role oxidu uhličitého nezastupitelná: parciální tlaky CO₂ jsou řídicí proměnnou krasových procesů jako je (1) rozpouštění karbonátových hornin v epikrasu (Stumm – Morgan 1996; Ford – Williams 2007), (2) růst kalcitových a aragonitových speleotém v jeskynních systémech (Faimon et al. 2000; Fairchild et al. 2006), případně i (3) koroze speleotém (Sarbu – Lascu 1997; Faimon et al. 2006).

V krasových systémech lze identifikovat několik důležitých zdrojů CO₂. Za nejvýznamnější jsou považovány půdy (Bourges et al. 2001; Batiot-Guilhe et al. 2007), ve kterých je CO₂ produkován (1) autotrofním dýcháním kořenového systému vegetačního pokryvu, (2) heterotrofní biodegradací organického detritu (Kuzyakov 2006; Kuzyakov – Gavrichkova 2010), resp. (3) abiotickým zvětráváním karbonátových hornin (Emmerich 2003, Serrano-Ortiz et al. 2009). Dalším zdrojem může být produkce (pravděpodobně biogenní) hlouběji v epikrasu (Benavente et al. 2010). Koncentrace půdního CO₂ jsou mnohonásobně vyšší (až 1,0 obj. % a více) než v externí atmosféře (0,035 obj. %).

Jak vyplývá z celé řady přímých měření, tak se koncentrace CO₂ ve svrchních částech krasových půd většinou pohybují v rozmezí 0,1 až 1,0 obj. % (Yoshimura et al. 2001; Spötl et al. 2005; Faimon – Ličbinská 2010; Sanchez-Cañete et al. 2011; Faimon et al. 2012a; Plestenjak et al. 2012). Dynamika půdního CO₂ závisí na celé řadě faktorů. Uplatňuje se teplota půdní atmosféry (dána intenzitou solárního záření), charakter vegetačního pokryvu (typ, fotosyntéza, fenologické aspekty, hustota/hloubka kořenového systému, množství a povaha organického detritu), obsah vody v půdním profilu a úhrny srážek, charakter půdního profilu (typ a hloubka půd, textura, struktura, pórovitost), klimatické podmínky (turbulentní proudění vzduchu, výkyvy atmosférického tlaku) a různé antropogenní vlivy (např. intenzivní zemědělská činnost). Za normálních okolností vykazuje dynamika CO₂ u většiny typů půd denní a sezónní oscilace (např. Nakadaï et al. 2002; Jassal et al. 2005; Albanito et al. 2009 a další).

V nedávné době se objevily hypotézy, že dalším možným zdrojem je CO₂ z podzemních krasových prostor (např. Kowalski et al. 2008; Were et al. 2010; Cuezva et al. 2011; Sanchez-Cañete et al. 2011). Epizodní toky z těchto prostor do externí atmosféry lze připustit, vzhledem k předpokládaným koncentracím CO₂ v epikrasu a vadózní zóně v jednotkách objemových procent (Batiot-Guilhe et al. 2007; Benavente et al. 2010). Dominantní cesty transportu CO₂ lze předpokládat podél tektonických predispozic (puklinami). Hnací silou je pravděpodobně proudění vzduchu (dané rozdílem hustot, snad i akcelerované turbulentními

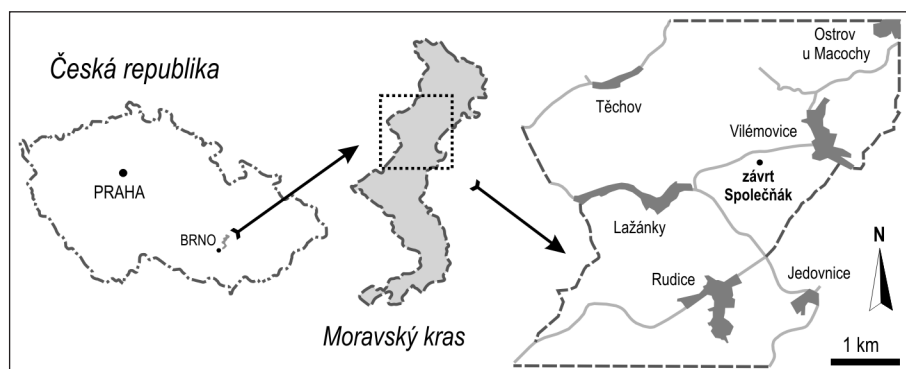
změnami ve venkovní atmosféře) a koncentrační gradienty. Roland et al. (2013) naznačují, že dotace nadložního půdního pokryvu oxidem uhličitým může probíhat i ve velmi krátkých časových intervalech.

Cílem této práce bylo otestovat výše uvedenou hypotézu a identifikovat vliv subterénní ventilace na koncentrace CO₂ v půdním pokryvu v místech, kde by měl být tento vliv největší: uvnitř tělesa závrtu a jeho nejbližším okolí.

Metodika

Místo měření

Pro monitoring koncentrací půdního CO₂ byl na území CHKO Moravský kras vybrán závrt Společňák (ZS) nacházející se na Harbešské plošině v katastrálním území Vilémovice u Macochy (obr. 1). Moravský kras je



Obr. 1: Mapka místa studia (Moravský kras). Detaily vzorkovacího místa v textu.
Fig. 1: Sketch map of the study site (Moravian Karst). See text for details.

největší a nejvýznamnější krasovou oblastí České republiky, jež tvoří pruh široký 3–6 km a dlouhý cca 25 km (plocha cca 92 km²) a je budován především středně a svrchně devonskými vápenci, na které je vázán výskyt typického půdního představitel v krasu – rendziny. Plošně významné zastoupení mají také hnědozemě a luvizemě (na tzv. plošinách), dále pak kambizemě na spodnokarbonských nekrasových flyšových sedimentech drahanského kulmu, zejména na hranicích a ve střední části CHKO (Němeček et al. 1967; AOPK 2008).

Závrt Společňák má okrouhlý obrys a trychtýřovitě kotlovitý tvar o průměru ~ 45 m včetně 5–6 m ochranného travnatého lemu, hloubka závrtu je ~ 7 m, sklony svahů jsou ~ 20–30°. Závrt je součástí Harbešské jeskyně prospastovitého charakteru, která je díky své komplikované stavbě a obtížné přístupnosti dosud nepřilíši zmapovaná. Nachází se v ní i jedna z největších podzemních prostor Moravského krasu – dóm Hala, který je nyní již jen reliktem mohutné meandrující chodby. Závrt je logisticky celoročně dobře přístupný.

Vegetační pokryv závrtu Společňák je tvořen mezofilním trvalým travním porostem (např. psárka luční, lipnice luční), jako solitérní doprovod se zde pak vyskytují křoviny (např. růže šípková). Celé okolí závrtu je intenzivně zemědělsky využíváno klasickým systémem hospodaření. Monitoring koncentrací CO₂ se uskutečnil ve 2 etapách, v letním období (po sklizni řepky olejné, 23. srpna 2013)

a zimním období (na poli vzešlá ozimá pšenice, 20. února 2014), vždy mezi 10.00 a 16.00 hod.

Půdy v oblasti studovaného závrtu

Pro pedologickou charakteristiku půd byla využita jádra z 25 půdních sond hlubokých 60 cm, několika doplňkových průzkumných vrtů do větších hloubek pomocí Edelmannových spirálovitých půdních vrtáků a také nedávný přírodní sesuv jedné ze stěn závrtu. Po zčištění svahu do kolmice a úpravě spodní části profilu až do hloubky 90 cm byla provedena fotodokumentace a stratigrafický popis. Půdy v oblasti závrtu Společňák jsou hluboké (> 60 cm) a nasedají na karbonátové podloží tvořené vilémovickými vápenci. Jako půdotvorný substrát se zde však uplatňuje alochtonní materiál (sprašová hlína), která může dosahovat mocností metr i více. Jelikož se jedná o mírnou terénní depresi, jsou půdy místy i hydromorfně ovlivněné, avšak často až v hloubkách nad 60 cm. V samotném tělese závrtu je půdní profil částečně degradovaný akumulacemi antropogenního i přírodního rázu. V rámci současného taxonomického klasifikačního systému půd ČR (Němeček et al. 2011) lze půdy na monitorovacích místech zařadit mezi referenční třídu luvisoly, půdní typ hnědozem, subtyp modální a varietu slabě (hluboko) oglejenou (HNmg'), kdy schematické znázornění sekvence jednotlivých horizontů ve zkráceném popisu lze vyjádřit jako: Ad-Ev-Bt-Btg/C-C. Tento modální subtyp přechází na řadě míst (v závrtu i na poli) až do subtypu oglejeného (HNg), tzn. výrazné redoximorfni znaky v hloubce do 60 cm, hlavně v luvickém Bt horizontu.

Způsob měření

Na sledované lokalitě bylo zhotoveno ocelovou sondovací tyčí celkem 25 půdních sond o průměru 2 cm a hloubce 60 cm: na dně závrtu byla vyvrtána centrální půdní sonda, poté ve směru SV–JZ a SZ–JV (obr. 2a) dalších 6 identických sond v rozmezí šesti metrů od sebe. V každém směru se tak 3 sondy nacházely ve vlastním tělese závrtu a 3 sondy mimo něj (obr. 2b). Přímou v atmosféře těchto půdních sond byla pomocí univerzálního měřiče ALMEMO 2590-4S měřena koncentrace CO₂ (detektor FYA600-CO₂H, na principu dvoukanalového infračerveného absorpčního spektrometru, Ahlborn, Německo). Rozsah měření: 0 až 10 000 ppmv, přesnost: 0 do 5 000 ppmv ± 50 ppmv + 2% z měřených hodnot, od 5 000 do 10 000 ppmv ± 100 ppmv + 3% z měřených hodnot, rozlišení: 1 ppmv nebo 0,0001 obj. %. Teplota a vlhkost venkovní a půdní atmosféry byla měřena senzorem FHA646E1 (Ahlborn, Německo). Rozsah měření: -20 až +70 °C, přesnost (-20 až 0 °C) ± 0,4 °C, (0 až +70 °C)

± 0,1 °C; ± 2 % RH v rozsahu hodnot od 0 do 100 % RH při 25 °C. Sensory jsou válcového tvaru s průměrem 2 cm, což umožňuje snadnou instalaci v půdním vrtu. Vzhledem k jisté advekci vzduchu indukované zaváděním čidel se měřené proměnné před odečtením nechávaly ustalovat do konstantní hodnoty (standardní doba ustálení se pohybovala od 5 do 15 minut).

Zpracování dat a statistická analýza

Zpracování dat proběhlo v programech Microsoft Excel v10 a StatSoft Statistica v10. Statistická analýza byla provedena pomocí standardního t-testu dvou průměrů (Dupač – Hušková 2009).

Výsledky a analýza dat

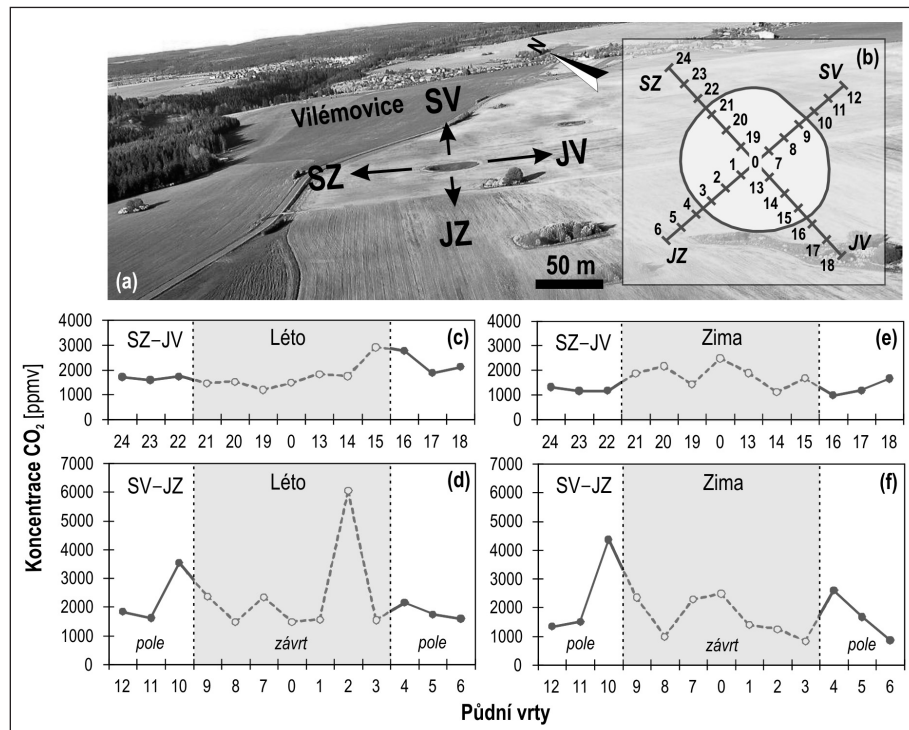
V letním období se aktuální teplota venkovní atmosféry pohybovala během měření kolem 22 ± 2 °C (léto), respektive 7,3 ± 1 °C (zima). Teplota půdní atmosféry byla stanovena během měření na 17 ± 0,6 °C (léto) a 2,6 ± 0,1 °C (zima). Vlhkost půdní atmosféry se pro obě etapy měření pohybovala kolem 95 % a vlhkost venkovní atmosféry byla v létě stanovena na 52 % a v zimě na 75 %.

Ve směru SZ–JV se v letním období koncentrace CO₂ pohybovaly od 1 188 ppmv (absolutní minimum z celého letního měření) do 1 879 ppmv, pouze na hranici závrť/pole na jv. straně atakovaly hranici 3 000 ppmv (obr. 2c). Obecně byly zaznamenány mírně nižší koncentrace CO₂ v půdních sondách ve vlastním tělese závrťu, než v sondách umístěných na orné půdě. V zimním období (obr. 2e) byla situace opačná, nižší koncentrace byly zaznamenány na poli (986 až 1 660 ppmv) a vyšší v závrťu (1 104 až 2 482).

Ve směru SV–JZ byla situace o poznání komplikovanější. Při letním měření (obr. 2d) se koncentrace CO₂ v půdních sondách na orné půdě pohybovaly od 1 592 ppmv do 3 531 ppmv, ve vlastním tělese závrťu od 1 479 ppmv do 2 372 ppmv, krom jedné odlehle hodnoty (6 039 ppmv). Koncentrace CO₂ v zimním období (obr. 2f) vykazovaly velmi podobné hodnoty jako při monitoringu

během letní etapy (od 826 ppmv do 4 361 ppmv), přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo na hranici závrť/pole v sv. směru, velmi obdobně jako v létě. Průměrné koncentrace, standardní odchylky a intervaly spolehlivosti jsou shrnuty v tabulce 1.

Výsledky statistické analýzy (viz tab. 2) naznačují, že rozdíly mezi průměrnými koncentracemi CO₂ na poli a v závrťu nejsou statisticky významné ani v zimě, ani v létě. Případné vyloučení výše zmiňované odlehle hodnoty ze souboru výsledků analýzy nezmění. Rozdíly mezi koncentracemi v závrťu v zimě a v létě (srovnej na obr. 2c s 2e, resp. 2d s 2f) jsou nevýznamné jak ve směru SZ–JV (viz B–F v tab. 2), tak ve směru SV–JZ (viz D–H v tab. 2). Výjimku tvoří koncentrace CO₂ ve směru SZ–JV v zimě (viz obr. 2e a rozdíl E–F v tab. 2), kde průměrné koncen-



Obr. 2: Prostorová distribuce koncentrací CO₂ v půdě v oblasti závrťu Společňák; (a) – globální pohled, Harbešská plošina, foto: J. Flek, 2010; (b) – plánek půdních sond, pohled shora; (c) a (d) – koncentrace CO₂ v létě; (e) a (f) – koncentrace CO₂ v zimě.

Fig. 2: Spatial distribution of CO₂ concentrations in the soils of Společňák Sinkhole area, (a) – global view, Harbešchy Plateau, photo: J. Flek, 2010; (b) – plan of drill holes, top view; (c) and (d) – CO₂ concentration in the summer; (e) and (f) – CO₂ concentration in the winter.

Tab. 1: Statistika dat.
Tab. 1: Data statistics.

období	léto				zima			
	SZ–JV		SV–JZ		SZ–JV		SV–JZ	
směr	pole	závrť	pole	závrť	pole	závrť	pole	závrť
místo	A	B	C	D	E	F	G	H
symbol	A	B	C	D	E	F	G	H
počet měření n	6	7	6	7	6	7	6	7
průměr koncentrací [ppmv]	1 969,2	1 731,9	2 080,2	2 401,3	1 244,2	1 798,3	2 057,0	1 651,9
StaDev [ppmv]	433,5	559,7	739,1	1 652,7	229,0	456,6	1 263,0	698,7
int. spolehlivosti [ppmv]	346,8	414,7	591,4	1 224,3	183,3	338,3	1 010,6	517,6

StaDev – standardní odchylka
interval spolehlivosti při α = 0,05
StaDev – standard deviation
Confidence interval at α = 0.05

Tab. 2: T-test rozdílů v průměrných koncentracích mezi polem a závrtem (A-B, C-D, E-F a G-H) a mezi koncentracemi v závrtu, v zimě a v létě (B-F, D-H).

Tab. 2: T-test of differences in mean concentrations between the field and sinkhole (A-B, C-D, E-F and G-H) and between concentrations in the sinkhole, in the winter and in the summer (B-F, D-H).

porovnání průměrů (a)	A-B	C-D	E-F	G-H	B-F	D-H
t-parametr (b)	0,843	0,438	2,685	0,731	0,243	1,105
p-hodnota	0,209	0,335	0,011	0,24	0,406	0,145
významnost rozdílů	N	N	V	N	N	N

(a) dvojice průměrů (konzistentní s označením v tab. 1)

(b) parametr t pro rozdíl průměrů

p-hodnota – pravděpodobnost, že testovaná hypotéza neplatí

N - statisticky nevýznamný rozdíl ($p > 0,05$), V - statisticky významný rozdíl ($p < 0,05$)

(a) pair of averages (consistent with the label in tab. 1)

(b) the parameter t for the difference of averages

p-value - the probability that the tested hypothesis is rejected

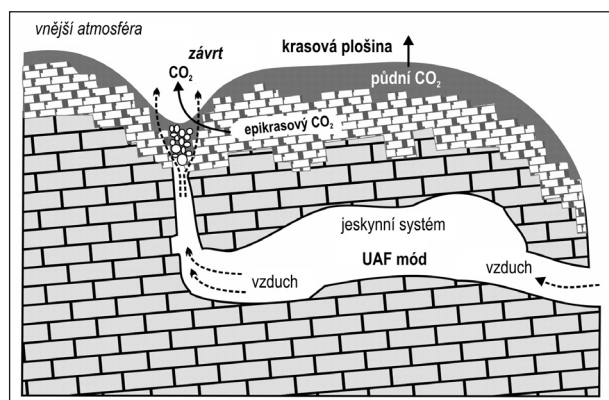
N - no statistically significant difference ($p > 0.05$), V - statistically significant difference ($p < 0.05$)

trace CO₂ v závrtu ($1\,798,3 \pm 338,3$ ppmv) mírně převyšily koncentrace na poli ($1\,244,2 \pm 183,3$ ppmv).

Diskuze

Stanovené koncentrace CO₂ v krasové půdě jsou v dobré shodě s jinými autory (viz Yoshimura et al. 2001; Spötl et al. 2005; Faimon – Ličbinská 2010; Sanchez-Cañete et al. 2011; Faimon et al. 2012a; Plestenjak et al. 2012 a další) a nijak nepřevyšují obvyklé hodnoty.

Hypotézu o existenci podpovrchového zdroje CO₂ poprvé vyslovil Atkinson (1977), poté v souvislosti s epikrasem například Fairchild et al. (2000) nebo Faimon et al. (2012a, 2012b). Benavente et al. (2010) a Vardillo et al. (2010) tento zdroj potvrdili i přímým měřením. Dotaci CO₂ půdního pokryvu skrze závrt (jakožto určité formy „komunikačního kanálu“ mezi vadózní zónou, epikrasem a půdním pokryvem) již naznačily zvýšené koncentrace CO₂ ve spodních patrech půdního profilu (Blecha – Faimon 2013). Závrt Společňák je pro takovou studii vhodný i vzhledem k tomu, že v atmosféře Harbešské jeskyně byly v minulosti popsány vysoké koncentrace CO₂, které dočasně zastavily tehdy probíhající speleoprůzkum (Musil et al. 1993). Konceptní model (viz obr. 3)



Obr. 3: Půdy a epikrasový CO₂ – konceptní model.
Fig. 3: Soil and epikarstic CO₂ – conceptual model.

napovídá, že v zimě lze předpokládat vzestupné proudění (upward airflow, UAF), půdní profil by byl promýván směrem odspodu nahoru a vzduch by vynášel podzemní CO₂ do okolní atmosféry (Faimon et al. 2012c; Faimon – Lang 2013). V zimě by tak měly koncentrace v závrtu převyšovat koncentrace v půdách. V létě by tomu bylo naopak: proudění by bylo sestupné (downward airflow, DAF) a půdní CO₂, popř. CO₂ z epikrasu by byl „vymýván“ pronikajícím vzduchem z venkovní atmosféry a odnášen do podzemních prostor.

Ze statistické analýzy však vyplývá, že nalezené rozdíly mezi průměrnými koncentracemi na poli a v závrtu nejsou statisticky významné. Výjimkou byla mírně vyšší koncentrace v závrtu v jednom směru (SZ–JV) v zimním období (viz tab. 2, sloupec E-F). Tento rozdíl mezi polem a závrtem by mohl být projevem zvýšené koncentrace v epikrasu. Koncentrace CO₂ v jeskyni jsou v zimě obecně nízké – takže zvýšená koncentrace CO₂ by mohla pocházet právě z epikrasu. V odlišném směru vzorkování však tato možnost nebyla potvrzena. Také rozdíly mezi koncentracemi v závrtu v létě a v zimě tento jev nepotvrdily (tab. 2, B-F, B-H). Tyto výsledky tak neprokázaly přesvědčivě vliv subterénní ventilace na koncentrace půdního CO₂, tak jak prezentovali např. Kowalski et al. (2008), Were et al. (2010) a Sanchez-Cañete et al. (2011).

Závěr

Na lokalitě v oblasti závrtu Společňák v Moravského krasu byla studována prostorová a časová distribuce koncentrací CO₂ v půdách závrtu a v jeho bezprostředním okolí. Studie měla otestovat vliv ventilace podzemních prostor na koncentrace CO₂ v půdním profilu. Výsledky studie celkově roli subterénní ventilace nepotvrdily. V jednom případě sice nalezené koncentrace byly ve shodě s předpokládaným modelem, celkově však byly výsledky nepřesvědčivé.

K definitivnímu potvrzení či vyvrácení hypotézy o vlivu ventilace podzemních prostorů na půdní CO₂ je tak nutný další komplexní průzkum s dalšími sledovanými proměnnými (např. koncentrace CO₂ a proudění vzduchu v níže ležícím jeskynním systému). Dále by byla užitečná větší prostorová i časová hustota vzorkování na více lokalitách.

Poděkování

Příspěvek vznikl za institucionální podpory Masarykovy univerzity v letech 2013–2014. Autoři děkují doc. Mgr. Martinu Ivanovovi, Dr. za kritické připomínky a Ing. Janu Flekovi za poskytnuté letecké fotografie Harbešské plošiny.

Literatura

- Albanito, F. – Saunders, M. – Jones, M. B. (2009): Automated diffusion chambers to monitor diurnal and seasonal dynamics of the soil CO₂ concentration profile. – *European Journal of Soil Science*, 60, 507–514.
- AOPK (2008): Půdní mapy ČR v měřítku 1:50 000. Listy: 24-23 Protivanov, 24-32 Brno a 24-41 Vyškov.
- Atkinson, T. (1977): Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones. – *Journal of Hydrogeology*, 35, 111–123.
- Batiot-Guilhe, Ch. – Seidel, J.-L. – Hervé, J. – Hébrard, O. – Bailly-Comte, V. (2007): Seasonal variations of CO₂ and ²²²Rn in a mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Aumelas, SE France). – *International Journal of Speleology*, 36, 51–56.
- Benavente, J. – Vadillo, I. – Carrasco, F. – Soler, A. – Lián, C. – Moral, F. (2010): Air carbon dioxide contents in the vadose zone of a Mediterranean karst. – *Vadose Zone Journal*, 9, 126–136.
- Blecha, M. – Faimon, J. (2013): Stratifikace CO₂ v půdním vzduchu (Moravský kras). – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, ročník 20, 1–2, 167–169.
- Bourges, F. – Mangin, A. – d'Hulst, D. (2001): Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques: l'exemple de l'Aven d'Orgnac (Ardeche). – *Earth and Planetary Sciences*, 333, 685–692.
- Cuezva, S. – Fernandez-Cortez, A. – Benavente, D. – Serrano-Ortiz, P. – Kowalski, A. S. – Sanchez-Moral, S. (2011): Short-term CO₂(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: Role of the surface soil layer. – *Atmospheric Environment*, 45, 1418–1427.
- Dupač, V. – Hušková, M. (2009): Pravděpodobnost a matematická statistika. – Karlova Univerzita, Karolinum, Praha.
- Dürr, H. H. – Meybeck, M. – Dürr, S. H. (2005): Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. – *Global Biogeochemical Cycles*, 19, DOI: 10.1029/2005GB002515.
- Emmerich, W. E. (2003): Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. – *Agricultural and Forest Meteorology*, 116, 91–102.
- Faimon, J. – Štelcl, J. – Zimák, J. – Slavík, P. (2000): Dynamika skapových vod (Císařská jeskyně, Moravský kras). – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, ročník 7, 147–149.
- Faimon, J. – Štelcl, J. – Schwarzová, M. – Zajíček, P. – Zimák, J. (2006): Recentní krasové procesy: destrukce speleotém. – *Závěrečná zpráva GAČR 205/03/1128*, 1–47.
- Faimon, J. – Ličbinská, M. (2010): Carbon dioxide in the soils and adjacent caves of the Moravian Karst. – *Acta Carsologica*, 39/3, 463–475.
- Faimon, J. – Ličbinská, M. – Zajíček, P. (2012a): Relationship between carbon dioxide in Balcarka Cave and adjacent soils in the Moravian Karst region of the Czech Republic. – *International Journal of Speleology*, 41, 17–28.
- Faimon, J. – Ličbinská, M. – Zajíček, P. – Šrámek, O. (2012b): Partial pressures of CO₂ in epikarstic zone deduced from hydrogeochemistry of permanent drips, the Moravian Karst, Czech Republic. – *Acta Carsologica*, 41/1, 47–57.
- Faimon, J. – Troppová, D. – Baldík, V. – Novotný, R. (2012c): Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). – *International Journal of Climatology*, 32, 599–623.
- Faimon, J. – Lang, M. (2013): Variances in airflows during different ventilation modes in a dynamic U-shaped cave. – *International Journal of Speleology*, 2, 115–122.
- Fairchild, I. J. – Borsato, A. – Tooth, A. F. – Frisia, S. – Hawkesworth, C. J. – Huang, Y. – McDermott, F. – Spiro, B. (2000): Controls on trace element (Sr–Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. – *Chemical Geology*, 166, 255–269.
- Fairchild, I. J. – Frisia, S. – Borsato, A. – Tooth, A. F. (2006): Speleothems. – In: Nash, D. J. – McLaren, S. J. (eds): *Geochemical Sediments and Landscapes*, Blackwells, Oxford.
- Ford, D. – Williams, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Wiley; Revised edition.
- Jassal, R. – Black, A. – Novak, M. – Morgenstern, K. – Nestic, Z. – Gaumont-Guay, D. (2005): Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes. – *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 176–192.
- Kowalski, A. S. – Serrano-Ortiz, P. – Janssens, I. A. – Sanchez-Moral, S. – Cuezva, S. – Domingo, F. – Were, A. – Alados-Arboledas, L. (2008): Can flux tower research neglect geochemical CO₂ exchange? – *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1045–1054.
- Kuzyakov, Y. (2006): Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. – *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 425–448.
- Kuzyakov, Y. – Gavrichkova, O. (2010): Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls. – *Global Change Biology*, 16, 3386–3406.
- Musil, R. et al. (1993): *Moravský kras – labyrinty poznání*. – GEO program. Adamov.
- Nakadaï, T. – Yokozawa, M. – Ikeda, H. – Koizumi, H. (2002): Diurnal changes of carbon dioxide flux from bare soil in a agricultural field in Japan. – *Applied Soil Ecology*, 19, 161–171.
- Němeček, J. et al. (1967): *Komplexní průzkum zemědělských půd ČSSR. Průvodní zpráva okresu Blansko*. – VÚMOP Praha. Brno.
- Němeček, J. et al. (2011): *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. 2 upravené vydání*. – ČZU, Praha.
- Plestenjak, G. – Eler, K. – Vodnik, D. – Ferlan, M. – Čater, M. – Kanduč, T. – Simončič, P. – Ogrinc, N. (2012): Sources of soil CO₂ in calcareous grassland with woody plant encroachment. – *Journal of Soil Sediments*, 12, 1327–1338.
- Ridgwell, A. – Zeebe, R. E. (2005): The role of the global carbonate cycle in the regulation and evolution of the Earth system. – *Earth and Planetary Science Letters*, 234, 299–315.
- Ronald, M. – Serrano-Ortiz, P. – Kowalski, A. S. – Goddérís, Y. – Sánchez-Cañete, E. P. – Ciais, P. – Domingo, F. – Cuezva, S. – Sanchez-Moral, S. – Longdoz, B. – Yakir, D. – Van Grieken, R. – Schott, J. – Cardell, C. – Janssens, I. A. (2013): Atmospheric turbulence triggers pronounced diel pattern in karst carbonate geochemistry. – *Biogeosciences*, 10, 5009–5017.
- Sánchez-Cañete, E. P. – Serrano-Ortiz, P. – Kowalski, A. S. – Oyonarte, C. – Domingo, F. (2011): Subterranean CO₂ ventilation and its role in the net ecosystem carbon balance of a karstic shrubland. – *Geophysical research letters*, 38, L09802, DOI: 10.1029/2011GL047077.

- Sarbu, S. M. – Lascu, C. (1997): Condensation corrosion in Movile cave, Romania. – *Journal of Cave and Karst Studies*, 59, 99–102.
- Serrano-Ortiz, P. – Domingo, F. – Cazorla, A. – Were, A. – Cuezva, S. – Villagarcía, L. – Alados-Arboledas, L. – Kowalski, A. S. (2009): Interannual CO₂ exchange of a sparse Mediterranean shrubland on a carbonaceous substrate. – *Journal of Geophysical Research*, 114, G04015, DOI: 10.1029/2009JG000983.
- Schlesinger, W. H. – Andrews, J. A. (2000): Soil respiration and the global carbon cycle. – *Biogeochemistry*, 48, 7–20.
- Spötl, CH. – Fairchild, I. J. – Tooth, A. F. (2005): Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 2451–2468.
- Stumm, W. – Morgan, J. J. (1996): *Aquatic chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. – Wiley-Interscience; 3rd edition.
- Vadillo, I. – Benavente, J. – Carrasco, F. – Soler, A. – Liñán, C. (2010): Isotopic (¹³C) Signature of CO₂ Sources in the Vadose Zone of a Mediterranean Karst (Nerja Cave Site, Southern Spain). – *Environmental Earth Sciences, Advances in Research in Karst Media*, 463–468.
- Were, A. – Serrano-Ortiz, P. – Moreno de Jong, C. – Villagarcía, L. – Domingo, F. – Kowalski, A. S. (2010): Ventilation of subterranean CO₂ and Eddy covariance incongruities over carbonate ecosystems. – *Biogeosciences*, 7, 859–867.
- Yoshimura, K. – Nakao, S. – Noto, M. – Inokura, Y. – Urata, M. – Chen, P. – Lin, P. W. (2001): Geochemical and stable isotope studies on natural water in the Taroko Gorge karst area, Taiwan – chemical weathering of carbonate rocks by deep source CO₂ and sulfuric acid. – *Chemical Geology*, 177, 415–430.