

STRATIFIKACE CO₂ V PŮDNÍM VZDUCHU (MORAVSKÝ KRAS)

Stratification of CO₂ in soil air (Moravian Karst)

Martin Blecha^{1,2}, Jiří Faimon¹

¹ Ústav geologických věd PŘF MU, 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: CO₂ concentration, Moravian Karst, soil air, stratification

Abstract

Soil CO₂ is important part of the global carbon cycle. In karst, it controls fundamental processes as limestone dissolution and calcite speleothem growth. Dynamics and mechanisms of soil CO₂ production are still little known. This study contributes to their better understanding. On the selected sites of Moravian Karst with different vegetation cover, the CO₂ stratification in the free air of soil drill-hole was studied during both non-vegetation and early vegetation periods. At all sites, CO₂ concentrations were found to increase with depth of air column. In spring, the agricultural soils (field) and the soil under grassy vegetation (sinkhole) showed the enormous gradients in CO₂ concentrations, up to 1000 ppmv per one dm of length, towards the depth. A conceptual model was proposed to discuss in detail the gradient evolution.

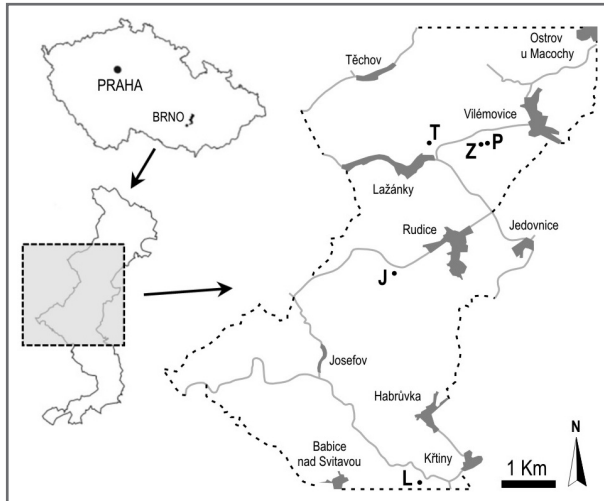
Úvod

Role CO₂ je v karbonátových krasových systémech nezastupitelná: parciální tlaky CO₂ jsou řídicí proměnnou krasových procesů jako je (i) rozpouštění karbonátových hornin v epikrasu (Ford – Williams 2007, Stumm – Morgan 1996), (ii) růst speleotém v jeskynních systémech (Faimon et al. 2000, Fairchild et al. 2006), (iii) případně i koroze speleotém (Sarbu – Lascu 1997, Faimon et al. 2006). Významným zdrojem krasového CO₂ jsou půdy, ve kterých je CO₂ produkováno (1) autotrofním dýcháním kořenového systému vegetačního pokryvu a (2) heterotrofní biodegradací organického detritu (Kuzyakov – Cheng 2001, Kuzyakov 2006).

Koncentrace CO₂ v půdním vzduchu jsou mnohonásobně vyšší (běžně kolem 1,0 obj. %) než v atmosféře (0,035 obj. %). Půdní CO₂ je významnou složkou cyklu uhlíku, protože globální toky CO₂ z půd do atmosféry jsou zhruba 10krát vyšší (~ 75 Gtun C-rok⁻¹, Schlesinger – Andrews 2000), než veškeré antropogenní emise. Pro produkci půdního CO₂ je naprosto klíčová organominerální humusová vrstva (horizont A), která dodává do půdního profilu organické látky a pravděpodobně i většinu CO₂ (např. Risk et al. 2002, Jassal et al. 2005). Zimmermann et al. (2009) pokládají za nejproduktivnější část půdního profilu organický horizont (horizont nadložního humusu), který je tvořen částečně rozloženými rostlinnými relikty a opadem. Je vyčleněn nad humusový horizont a vyskytuje se prakticky jen u lesních půd (Vopravil et al. 2009). Např. Jassal et al. (2005) uvádí, že 75 % veškerého toku do vnější atmosféry má původ ve svrchních 20 cm půdního profilu. Ovšem organický uhlík není vázán jen na humusový horizont, ve velkém množství se vykytuje i hlouběji v půdách (Jobbágy – Jackson 2000). Navzdory názorům, že v produkci CO₂ dominuje humusová vrstva, někteří autoři (např. Li et al. 2002, Fierer et al. 2005) protiargu-

mentují nárůstem koncentrace CO₂ směrem do hlubších partií půdního profilu. Produkce CO₂ v půdách závisí na celé řadě faktorů, primárně na teplotě a vlhkosti půdní atmosféry. Dále se uplatňují hloubka/charakter půdního profilu, množství/povaha organického detritu (odvozená od typu, hustoty a stáří vegetačního pokryvu), úhrny srážek, fotosyntéza rostlin, intenzita slunečního záření a různé antropogenní vlivy (např. intenzivní zemědělská činnost, kyselá atmosférická depozice apod.). Transport CO₂ (toky) se v půdním profilu odehrává dvěma hlavními mechanismy: (1) rozpuštěný CO₂ je transportován vsakujícími se vodami, (2) plynný CO₂ volně difunduje ve směru koncentračního gradientu.

Koncentrace CO₂ v půdním profilu vykazují výrazné denní a sezónní oscilace s maximy během letních měsíců (Nakadai et al. 2002, Rayment – Jarvis 2000, Risk et al. 2002). Směrem do hlubších partií půdního profilu zůstává zachována sezónní variabilita v koncentracích, ale současně dochází ke smazání výrazných denních výkyvů v produkci půdního CO₂ (Nakadai et al. 2002). Vyrovnané teploty a humóznější prostředí hluboko v půdách do jisté míry umožňují netlumenou aktivitu dekompozitorů organického detritu v zimních měsících. Pak zde převládá heterotrofní mikrobiální aktivita, která mineralizuje naakumulované organické látky kontinuálně bez výkyvů. Tudiž v chladných měsících tyto hluboko položené horizonty přispívají nejvýrazněji k celkové produkci CO₂ (Risk et al. 2002, Hashimoto et al. 2007). Např. Fierer et al. (2005) upozornili na to, že heterotrofní mikrobiální aktivita převládá nad aktivitou kořenového systému vegetačního pokryvu právě v těchto spodních patrech půdního profilu.



Obr. 1: Mapka místa studia (Moravský kras). Details vzorkovacích míst jsou v textu.

Fig. 1: Sketch map of the study sites (Moravian Karst). See text for details.

Metodika

Místo měření

Pro monitoring koncentrací půdního CO_2 bylo na území CHKO Moravský kras vybráno 5 lokalit s odlišným vegetačním pokryvem: lokalita na k. ú. Březina v blízkosti jeskyně Výpustek v listnatém lese (L), lokalita na k. ú. Rudice v monokulturním jehličnatém lese (J), neobdělávaná louka s travnatým porostem na Harbešské plošině (T), závrť Společňák s travnatým porostem (Z) a zemědělsky využívaná orná půda (pole s hustým pokryvem výhonků pšenice) v těsné blízkosti závrtu Společňák (P), (viz obr. 1). Monitoring na těchto lokalitách proběhl ve 2 etapách, v únoru za nízkých teplot a na přelomu dubna a května za vysokých teplot, na počátku vegetačního cyklu.

Půdy

Taxonomicky (Němeček et al. 2011) byly půdy na monitorovacích místech klasifikovány jako: rendzina modální (T), hnědozem modální (L, Z a P) a pseudoglej modální (J). Všechny klasifikované půdy jsou vyvinuté na karbonátovém podloží, ovšem jako půdotvorný substrát se na většině lokalit (L, Z, J a P) uplatňuje alochtonní materiál (spraš a sprašová hlína). Nejmělčí půdy (do 30 cm) byly zastiženy na staré a zemědělsky nevyužívané louce (T) s devonským vápencem jako matečným substrátem. Nejhlubší půdní profil byl zastižen na dně závrtu Společňák. Je částečně tvořen mohutnými akumulacemi materiálu sekundárně deponovaného jak antropogenně, tak přírodní soliflukcí. Přes značně poškozený půdní profil akumulacími procesy nelze půdu (Z) klasifikovat jako koluvizem, protože nesplňuje další kritéria. Hloubka vrtané sondy byla omezena délkou vrtné soupravy.

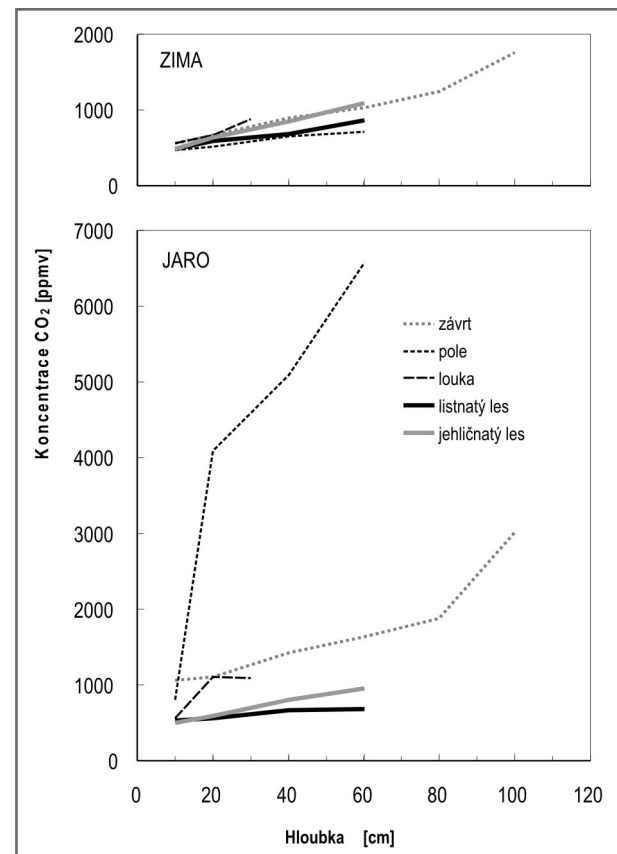
Způsob měření

Na každé lokalitě byla pomocí půdního vrtáku o průměru 7 cm vyvrtána jedna půdní sonda až na matečný substrát/podložní horninu. V různých výškových pozicích vrtu byla pomocí univerzálního měřiče ALMEMO 2290-4

V5 měřena koncentrace CO_2 (detektor FT A600- CO_2H , Ahlborn, Německo, rozsah: 0 až 10 000 ppm, přesnost: 0 do 5 000 ppm \pm 50 ppm + 2% z měřených hodnot, od 5 000 do 10 000 ppm \pm 100 ppm + 3% z měřených hodnot, rozlišení: 1 ppm nebo 0,0001 obj. %) a teplota půdní atmosféry (senzor FHA646E1, Ahlborn, Německo, rozsah: -20 až +70 °C, přesnost: -20 až 0 °C \pm 0,4 °C, 0 až +70 °C \pm 0,1 °C). Teplota venkovní atmosféry byla měřena stejným zařízením. Při měření koncentrací CO_2 ve vrtu byla čidla v příslušné hloubce fixována pomocí speciálního nástavce. Vzhledem k advekci vzduchu při zavádění čidel se měřené proměnné před odečtením nechávaly ustalovat do konstantní hodnoty (standardní doba ustálení se pohybovala od 5 do 15 minut). Zpracování dat proběhlo v programu Microsoft Excel v. 10.

Výsledky a diskuze

V zimním období byly všechny lokality pokryty souvislou vrstvou sněhu (cca 5–10 cm). Teplota vnější atmosféry se pohybovala okolo -1 až +2 °C a teplota půdní atmosféry v intervalu od +1,5 do +2,5 °C napříč půdním profilem. Na všech monitorovacích místech rostly koncentrace CO_2 odshora dolů směrem k bázi půdního profilu s gradientem 50 až 160 ppmv na 1 dm hloubky vrtu. Minima v koncentracích CO_2 byla nalezeny v blízkosti povrchu a činila 500–600 ppmv (viz obr. 2). Maxima, cca 1 800 ppmv, byla zastižena na závrtu Společňák v hloubce 100 cm. Nejnížší koncentrace CO_2 napříč půdním vrtem byly stanoveny v orné půdě.



Obr. 2: Stratifikace koncentrací CO_2 v půdním vzduchu.
Fig. 2: Stratification of the CO_2 concentrations in soil air.

Monitoring v jarním období byl poznamenán nevykykle vysokými teplotami, kdy se teplota atmosférického vzduchu pohybovala okolo 23–25 °C (v daném období maxima za 200 let). Distribuce teploty půdní atmosféry byla na stinných lokalitách velmi podobná – klesala s hloubkou půdního profilu (od 18 °C do 13 °C). Na místech exponovaných slunečním zářením (lokality s travním porostem a pole) byla teplota blízko povrchu vyšší (až 22 °C) a pokles do hloubky výraznější. Koncentrační gradient CO_2 směrem do hloubky byl na jaře podstatně zesílen na lokalitách závrť (Z) a pole (P), kde se pohyboval od 190 až do 1 000 ppmv na 1 dm hloubky vrtu. V nejhlubších polohách vrtů byly naměřeny koncentrace až cca 3 000 ppmv (Z) a 6 500 ppmv (P). Extrémní gradient ve vrtu v zemědělsky využívané půdě (P) by mohl souviset s hnojením a pronikáním většího množství organické hmoty do podloží. Důvodem by mohla být i produkce kořenovým systémem právě klíčící pšenice. Obdobné gradienty jako v zimě byly naměřeny na lesních lokalitách (L, J), což dobře koreluje s opožděným začátkem vegetačního období oproti travinám. Nárůst koncentrací CO_2 směrem do hloubky půdního profilu je ve shodě s některými autory (viz např. Fierer et al. 2005, Jassal et al. 2005, Li et al. 2002, Nakadai et al. 2002).

Stratifikace CO_2 nalezená ve vrtech je poněkud překvapivá: ve volné atmosféře vrtu by se spíše očekávalo rychlé vyrovnání koncentrací difúzí. Na obrázku 3 je kon-

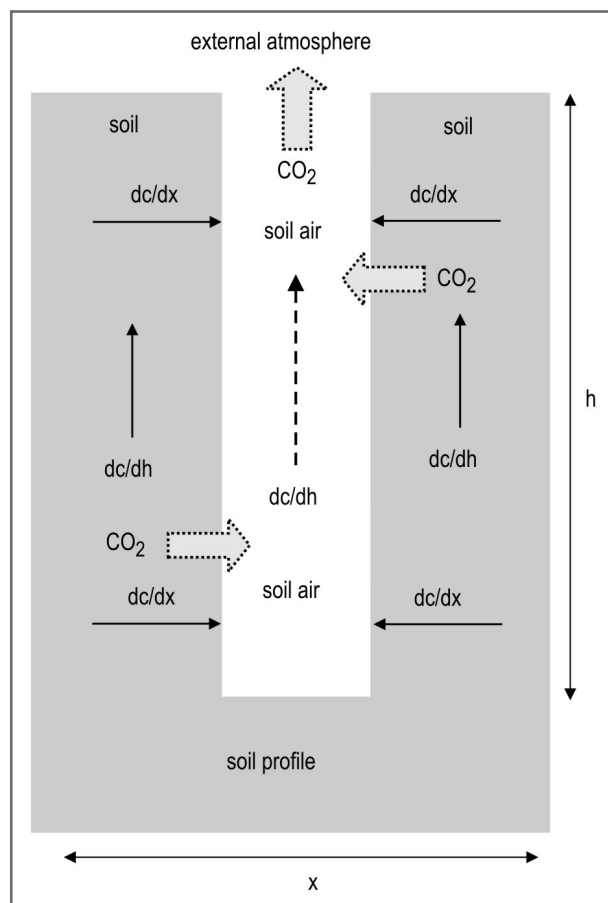
cepční model vrtu v půdním profilu s předpokládanými gradienty a difúzními toky. V porézním prostředí půdního vzduchu jsou přirozené koncentrační gradienty směrem vzhůru k povrchu půdy, na základě kterých půdní CO_2 migruje do venkovní atmosféry. Narušením půdního profilu vrtem pak vede ke vzniku dalších koncentračních gradientů ve vodorovném směru. Půdní CO_2 migruje do volné atmosféry vrtu a až následně vrtem vzhůru do venkovní atmosféry. To pak vede k ustavení vertikálního koncentračního gradientu také uvnitř vrtu. Výsledná stratifikace v půdní sondě vyžaduje vysokou produkci CO_2 v hlubších partiích půdního profilu. Tato je zřejmě podporována transportem organických látek prosakující vodou, které jsou následně rozkládány mikroorganizmy za uvolnění dalšího CO_2 . Vysoká produkce CO_2 ve svrchním humusovém horizontu je zřejmě kompenzována velkým vertikálním difúzním tokem z půd přímo do atmosféry (Schlesinger – Andrews 2000). Studie naznačuje, jak metodologicky obtížné je identifikovat čisté toky CO_2 v jednotlivých půdních subhorizontech.

Závěr

Na vybraných lokalitách Moravského krasu bylo studováno rozložení koncentrací CO_2 ve volné atmosféře mělkých půdních vrtů. Na všech sledovaných místech byl zaznamenán koncentrační gradient odshora dolů, s rostoucími koncentracemi směrem k bázi půdního profilu. S nárůstem koncentrací v jarním období vzrůstal i gradient, zejména na lokalitách s travnatým porostem (stará louka) a s mocným půdním pokryvem (závrť Společňák). Výjimkou byly dvě lesní lokality (listnatý i jehličnatý les), kde gradient zůstal obdobný jako v zimě, zřejmě v důsledku opoždění nástupu vegetačního období. Extrémní gradient byl zaznamenán v zemědělsky využívané půdě (pole). Svou roli zřejmě sehrálo antropogenní ovlivnění: hnojení a/nebo aktivita kořenového systému kulturních rostlin. Tento fakt znovu nastoluje otázku intenzivního hospodaření v chráněných oblastech na krasových půdách. Konceptní model naznačil mechanismy vzniku gradientu v atmosféře vrtů a také metodologické obtíže při kvantifikaci elementárních toků CO_2 v jednotlivých půdních subhorizontech.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory výzkumných záměrů MSM0021622412 MŠMT a MZE0002704902 MZe ČR a za institucionální podpory Masarykovy univerzity v letech 2012. Autoři děkují recenzentce M. Ličbinské z Institutu geologického inženýrství VŠB-TU Ostrava za kritické připomínky.



Obr. 3: Konceptní model vrtu v půdním profilu: koncentrační gradienty a difúzní toky CO_2 .

Fig. 3: Conceptual model of the drill-hole in soil profile: concentration gradients and diffuse fluxes of CO_2 .

Literatura

- Faimon, J. – Štelcl, J. – Zimák, J. – Slavík, P. (2000): Dynamika skapových vod (Císařská jeskyně, Moravský kras). – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 147–149.
- Faimon, J. – Štelcl, J. – Schwarzová, M. – Zajíček, P. – Zimák, J. (2006): Recentní krasové procesy: destrukce speleotém. – Závěrečná zpráva GAČR 205/03/1128, pp. 1–47.
- 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.
- Fierer, N. – Chadwick, O. A. – Trumbore, S. E. (2005): Production of CO₂ in Soil Profiles of a California Annual Grassland. – *Ecosystems* 8, 412–429.
- Ford, D. – Williams, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Wiley, Revised edition.
- Hashimoto, S. – Tanaka, N. – Kume, N. – Yoshifuji, N. – Hotta, N. – Tanaka, K. – Suzuki, M. (2007): Seasonality of vertically partitioned soil CO₂ production in temperate and tropical forest. – *Journal of Forest Research* 12, 209–221.
- 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.
- Jobbágy, E. G. – Jackson, R. B. (2000): The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. – *Ecological Applications* 10, 443–436.
- Kuzyakov, Y. – Cheng, W. (2001): Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. – *Soil Biology & Biochemistry* 33, 1915–1925.
- Kuzyakov, Y. (2006): Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. – *Soil Biology & Biochemistry* 38, 425–448.
- Li, T. – Wang, S. – Zheng, L. (2002): Comparative study on CO₂ sources in soil developed on carbonate rock and non-carbonate rock in Central Guizhou. – *Science in China (series D)* 45, 8, 673–679.
- Nakadai, 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. (2011): Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. 2. upravené vydání. – ČZU, Praha.
- Rayment, M. B. – Jarvis, P. G. (2000): Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in Canadian boreal forest. – *Soil Biology & Biochemistry* 32, 35–45.
- Risk, D. – Kellman, L. – Beltrami, H. (2002): Carbon dioxide in soil profiles: Production and temperature dependence. – *Geophysical research letters* 29, 6, 1–4.
- Sarbu, S. M. – Lascu, C. (1997): Condensation corrosion in Movile cave, Romania. – *Journal of Cave and Karst Studies* 59, 99–102.
- Schlesinger, W. H. – Andrews, J. A. (2000): Soil respiration and the global carbon cycle. – *Biogeochemistry* 48, 7–20.
- Stumm, W. – Morgan, J. J. (1996): *Aquatic chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. – Wiley-Interscience; 3rd edition.
- Vopravil, J. et al. (2009): Půda a její hodnocení v ČR. 1 díl. – VÚMOP, v. v. i., Praha
- Zimmermann, M. – Meir, P. – Bird, M. – Malhi, Y. – Ccahuana, A. (2009): Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest. – *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1338–1340.