

CO NÁS O VÝVOJI PŮD A INTERAKCÍCH MEZI VEGETACÍ, PŮDOU A PŮDNÍMI ORGANISMY NAUČILO STUDIUM VÝSYPEK A JINÝCH „KATASTROF“?

JAN FROUZ, OLGA VINDUŠKOVÁ

prof. Ing. Mgr. JAN FROUZ, CSc.

Viz str. 5

RNDr. OLGA VINDUŠKOVÁ, Ph.D.

Viz str. 5

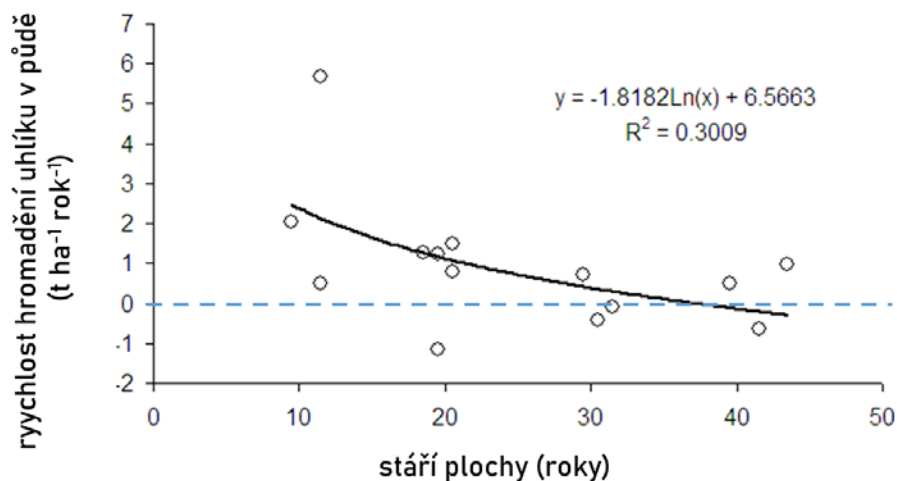
MLADÉ PŮDY POUTAJÍ CO₂ Z ATMOSFÉRY RYCHLEJI

Výsypky vznikají v důsledku povrchové těžby nerostných surovin. K tomu, aby mohl být vytěžen žádaný nerost, je třeba odkrýt nadložní vrstvy, tzv. hlušinu, která je ukládána na výsypky. Při tom dochází k zániku stávajících ekosystémů, které jsou buď odtěženy, nebo zasypány. Hlušina pochází často z velkých hloubek (často desítek metrů) a velmi se liší od vyvinutých půd. Na výsypkách rekultivovaných bez návzu ornice pak hlušina představuje půdotvorný substrát, na němž se vyvíjejí půdy „od píky“ (Obr. 1). Těžba zpravidla trvá na jedné lokalitě mnoho desítek let a neustále tak vznikají nové a nové plochy výsypek. To znamená, že zde můžeme vedle sebe najít plochy různě staré

a porovnání těchto ploch nám dává představu o jejich dlouhodobém vývoji. Pomocí takových porovnání zjišťujeme, že iniciální vývoj půd, tedy alespoň některých jejich parametrů, je poměrně rychlý. Příkladem takového rychlého procesu je hromadění uhlíku ve výsypkových půdách. To můžeme dobře pozorovat na výsypkách na Sokolovsku. Zde jsme dvakrát odebrali vzorky půdy na různých starých plochách s odstupem 10 a více let, což nám umožnilo zjistit, kolik uhlíku se zde za 10 let nahromadilo¹. Zatímco na mladších plochách se uhlík hromadí velmi rychle, až 2 tuny uhlíku na ha za rok (Obr. 2), s postupným stárnutím ploch se hromadění uhlíku v půdě zpomaluje a u ploch starších 50 let je již touto metodou sotva měřitelný. K podobným výsledkům jsme došli i na



Obr. 1 Pohled na část Podkrušnohorské výsypky, která byla ponechaná spontánní sukcesí – většina této výsypky nebyla při rekultivaci překryta ornici a můžeme zde tedy pozorovat iniciální vývoj půdy. Foto Jaroslav Kukla



Obr. 2. Množství uhlíku, které se ročně nahromadí v mladých výsypkových půdách klesá s jejich stářím a během 40–50 let. Zdroj: Bartuška a Frouz

základě studia dostupných literárních pramenů o rychlosti hromadění uhlíku na různé starých výsypkách u nás i ve světě². Potvrdilo se, že na velmi mladých výsypkách (<10 let) dosahují rychlosti hromadění uhlíku v půdě vysokých hodnot (přes 2 t ha⁻¹ rok⁻¹) a s postupujícím stářím výsypky se snižují. U ploch starších než 50 let se pohybují v nižších stovkách kg ha⁻¹ rok⁻¹, což jsou ostatně průměrné hodnoty rychlosti hromadění uhlíku, které můžeme dosáhnout zalesněním nebo zatravněním zemědělské půdy³. Abychom si ověřili tento poznatek v ještě delší časové perspektivě, studovali jsme hromadění uhlíku na sesuvech v Beskydech⁴. Podobně jako na výsypkách, i zde jsme měli plochy různého stáří (nejmladší byly 4 roky, nejstarší skoro 13 000 let). I zde se ukázalo, že hromadění uhlíku je velmi rychlé a během prvních 40–80 let je dosaženo hodnot podobných těm pozorovaných v okolních, sesuvem nepoznamenaných lesích, a že se později rychlost hromadění uhlíku v půdě velmi zpomalí. U starších ploch (starých několik tisíc let) se ale začne hromadit významnější množství uhlíku v nadložních horizontech (v opadu a fermentační vrstvě). Všechny tyto výsledky ukazují, že chceme-li podpořit rychlé hromadění uhlíku v půdě, bylo by výhodné se soustředit na plochy silně poškozené, kde uhlíku mnoho není, např. výsypky, půdy poškozené stavební činností či silnou erozí atp. Při vhodném managementu zde můžeme dosáhnout řádově větší rychlosti hromadění uhlíku než v okolní krajině. Navíc jsou na těchto plochách v důsledku absence půdní organické hmoty často významně omezeny jak jejich produkční funkce, tak funkce mimoprodukční (zadržování vody atp.). Hromadění uhlíku zde má tedy velký význam pro

rozvoj těchto ekosystémů. Navíc zde není tak silný trade-off mezi produkčními funkcemi a podporou funkcí mimoprodukčních vázaných právě na půdní uhlík. Jistě i zde je třeba postupovat uvážlivě, protože některé z těchto disturbovaných ploch mohou mít specifický význam pro podporu bioty vázané na specifická stanoviště jako např. duna a podobně, ale jistě by se i tak našlo dost vhodných ploch k cílenému hromadění uhlíku. Důvody, proč je hromadění uhlíku v těchto plochách tak rychlé, nejsou zcela uspokojivě objasněny. Zdá se ale, že to souvisí jednak s dostatkem volných míst na jílových minerálech, které mohou organickou hmotu vázat, jednak s řadou pozitivních zpětných vazeb, které způsobí, že hromadění uhlíku v jedné formě podporuje hromadění uhlíku ve formách jiných⁵.

JINÝ STROM (A STÁŘÍ PŮDY) – JINÝ MRAV

Vraťme se ale k pozorování dynamiky hromadění uhlíku na sesuvech v Beskydech. Řekli jsme si, že na začátku vývoje půd je hromadění organické hmoty v půdě soustředěno v minerálních vrstvách, zatímco u starších ploch (několik tisíc let starých) se uhlík hromadí spíše v nadložních horizontech. To nám ukazuje, že hlavní mechanismy hromadění uhlíku v půdě se mohou u mladých a starších půd lišit. K podobnému závěru dojdeme, porovnáme-li experimenty, ve kterých je sledováno hromadění uhlíku pod různými druhy stromů, na různě vyvinutých půdách. Když jsme například studovali množství uhlíku pod různými druhy stromů na iniciálních půdách na výsypkách⁶, zjistili jsme, že nejvýznamnější je zde hromadění uhlíku v minerální půdě (v A horizontu), zatímco opad a fermentační

vrstva přispívají k celkové zásobě jen málo. Největší akumulace uhlíku pak byla zaznamenána pod olšemi, které fixují vzdušný dusík a produkují velmi snadno rozložitelný opad. K podobným závěrům jsme došli na základě porovnání literárních dat z výsypkových půd⁷. Tam jsme u výsadeb na výsypkách pozorovali větší hromadění uhlíku pod listnáči (které také uhlík hromadí zejména v A horizontu) než pod jehličnany, kde se významné množství uhlíku hromadí v opadu a fermentační vrstvě na povrchu půd. Naproti tom Vesterdal a kol.⁸, kteří porovnávali různé druhy stromů vysazené na vyvinuté lesní půdě, zjistili nejvyšší ukládání C pod smrkem produkujícím obtížně rozložitelný opad, kde v celkové zásobě uhlíku hrály významnou roli nadložní horizonty. To dává tušit, že se na hromadění uhlíku v půdách podílejí různé mechanismy v různých stádiích jejich vývoje. I podmínky maximalizující hromadění uhlíku v půdě, která se nachází v různých stádiích vývoje, jsou tedy různé. Dále jsme v již zmíněném porovnání výsypkových půd⁷ viděli, že schopnost různých typů vegetace podporovat hromadění uhlíku v půdě souvisí s klimatem dané oblasti. Výsledky naznačovaly, že traviny podporují hromadění uhlíku spíše v teplejším klimatu (odpovídajícím biomu temperátních trávníků), zatímco jehličnaté lesy podporují hromadění uhlíku v chladnějším klimatu (odpovídajícím biomu tajgy) a listnaté lesy jsou někde mezi tím. To opět ukazuje, že postupy podporující hromadění půdní organické hmoty by měly být místně specifické, a že mechanistické přenašeni řešení úspěšných na jednom místě na jiná, zcela odlišná místa, nemusí být zárukou úspěchu, ba často je tomu právě naopak.

ZA VŠÍM HLEDEJ ŽÍŽALU

Již jsme zmínili, že rychlost a mechanismy hromadění uhlíku v půdě souvisí s vlastnostmi vegetace. To si můžeme názorně demonstrovat na již zmíněné studii⁶ o hromadění uhlíku pod různými druhy stromů vysazenými na jedné výsypce na Sokolovsku. Zkoumané dřeviny se lišily rozložitelností opadu, konkrétně poměrem uhlíku a dusíku v listech. Obecně platí, že čím je v opadu relativně více dusíku (C:N poměr je nižší), tím rychleji se rozkládá a rychleji se z něj uvolňují živiny. Naopak, je-li C:N poměr vysoký, opad se rozkládá pomaleji a obrát živin je pomalejší. Ze studie vyplynulo, že pod dřevinami se snadno rozložitelným opadem se uhlík hromadí nejrychleji a většina uhlíku se hromadí v organominerálním A horizontu, zatímco u stromů s hůře roz-

ložitelným opadem se více uhlíku hromadí na povrchu půdy v opadové a fermentační vrstvě a celkově je rychlost hromadění menší. Na první pohled vypadá nelogicky, že se snadno rozložitelný opad více hromadí. Dále byste se mohli ptát, co způsobuje, že se organická hmota z povrchu dostane do větších hloubek půdy v různé míře. Odpověď na obě záhady je stejná – žížaly. Plochy se snadno rozložitelným opadem totiž podporovaly větší populace žížal. Žížaly jednak zajišťují bioturbaci, tedy zamíchání organické hmoty do hlubších vrstev půdy. Činnost žížal ale přispívá k hromadění organické hmoty více než jen mechanickým promícháváním⁹. Žížaly totiž, a to je možná ještě důležitější, zapracují tuto organickou hmotu do půdních agregátů, kde jsou drobné kousičky organické hmoty (angl. particulate organic matter) obaleny tenkou vrstvičkou jílu¹⁰ asi jako vídeňský řízek. Toto obalení jednak zpomaluje dekompozici takto zabudovaného kousku organiky. To má řadu důvodů - mimo jiné to, že k ní kyslík musí dovnitř difundovat přes vodou napuštěnou vrstvu jílu. Tím se jeho difuze zpomalí a uvnitř tak častěji vznikají anaerobní podmínky, čímž se zpomaluje dekompozice. Kromě vlivu na dekompozici má tato „řízková“ konstelace ještě jeden význam. Na jílových minerálech v okolí tohoto drobného kousičku narůstají velké povlaky bakterií. Po jejich odumření zůstane většina jejich buněčných obalů přilepena na jílu a to nakonec vytváří většinu organické hmoty, která se dlouhodobě akumuluje v půdě. Činnost žížal je zde zcela zásadní. Když dáme do půdy opad, nebo jej i mechanicky zamícháme do půdy, nedosáhneme stejné míry hromadění uhlíku v půdě jako s pomocí žížal⁹. Můžeme tedy říci, že vliv dřevin na půdu je do značné míry zprostředkován půdní faunou, která ovlivňuje půdní mikrobiální procesy a ve svém důsledku i řadu funkcí půdy včetně hromadění uhlíku.

ZAČAROVANÝ KRUH ŽIVINOVÉ CHUDOBY (A BOHATSTVÍ)

Výše popsaný vztah mezi vlastnostmi rostlin a formováním půdy platí obecněji¹¹. Rostliny, které rostou v chudých půdách, mají snahu zadržovat většinu živin ve své biomase. Díky tomu mají často mimo jiné stálezelené listy nebo jehlice. Ty sice dlouho vydrží, ale zato je jejich rychlost fotosyntézy pomalá a to přispívá k tomu, že je pomalý i růst rostlin. Do půdy tak přichází méně opadu. Tento opad má navíc málo dusíku (vysoký CN poměr) a bývá často bohaté zásoben taniny a dalšími poly-

fenoly, kterými se rostlina snaží zajistit, aby jí listy dlouho vydržely a nesežrali je neřící herbivoři. Taniny ovšem zpomalují i dekompozici opadu. Ta je pomalá, podílí se na ní převážně houby a tím je i pomalé uvolňování živin do půdy. Většina zde rostoucích rostlin proto podporuje ektomykorhizní nebo erikoidní mykorhizní houby, které jim pomáhají získávat živiny z rozkládaného opadu. Chybí zde větší půdní živočichové, kteří by zamíchávali opad do půdy. Opad se hromadí na povrchu půdy, taniny se pomalu vyluhují a podporují tvorbu nízkomolekulárních látek (fulvokyseliny), které pomáhají vyluhovat živiny z vrchní vrstvy půd. Půda se tak ještě více ochuzuje o živiny a nutí rostliny zadržovat získané živiny ve své biomase a celý kruh se uzavírá. Jinak to vypadá v situaci, kdy je minerálních živin nadbytek, např. v dlouhostébelné prérii, v černozemních stepích atp. Jsou zde dobré podmínky pro fixaci atmosférického dusíku, a rostliny mají proto živin dostatek. Rostou rychle a produkují tenké listy, které mají velkou rychlost fotosyntézy. Tenké listy ale dlouho nevydrží a proto brzy opadnou a přichází do půdy. Přísun opadu je tak větší, a protože rostlina nemusí nijak šetřit živinami, obsahuje i hodně dusíku a dalších živin. To podporuje dekompoziční společenstvo s velkým zastoupením bakterií a žížal. Dochází zde k rychlému uvolňování živin, které podporuje růst rostlin. Na druhou stranu dochází díky aktivitě žížal k hromadění organické hmoty v půdě výše popsanými mechanismy. To zároveň podporuje schopnost těchto půd zadržovat vodu a živiny, a tak zůstane větší část mineralizovaných živin dostupná kořenům rostlin. Dostatek živin pak podporuje bujný růst rostlin a celý kruh se uzavírá.

ŽÍŽALY MĚNÍ VZTAH MEZI ROSTLINAMI, PŮDOU A DALŠÍMI PŮDNÍMI ORGANISMY

Vraťme se ještě na chvíli k funkci žížal. Ne že by žížaly byly jedinými významnými půdními organismy, ale je snadné o nich hovořit, protože většina čtenářů si je umí představit. Vizionářskou práci o činnosti žížal napsal Charles Darwin, který píše, že „není pochyb o tom, že žížaly patří k nejméně významným tvůrčím utvářejícím tvář naší planety“¹². Naše sledování sukcesních změn vegetace na výsypkách se ukázalo být vhodným modelem, který nám dal velmi detailně nahlédnout do funkce žížal při formování půd. Žížaly jsou totiž pomalými migranty a navíc musí mít pro své uchycení vhodné podmínky. Na plochy výsypek, které

byly ponechány vlastnímu vývoji spontánní sukcesí, tudíž přicházejí žížaly až po 20 letech vývoje těchto ploch. To nám dává možnost pozorovat vliv této žížalí kolonizace na fungování ekosystému. Porovnání vývoje vegetace s rozvojem půdní bioty a půdy¹³ ukázalo, že na půdách, které nebyly dosud kolonizovány žížalami, převládají pionýrské a ruderalní druhy rostlin. Po kolonizaci žížalami dochází k nárůstu v počtu lesních a lučních specialistů. Následně nám celá řada terénních a laboratorních manipulačních pokusů ukázala, že ovlivnění půdy žížalami obecně podporuje růst rostlin, přičemž žížaly více podporují pozdně sukcesní druhy než druhy raně sukcesní^{14,15}. Vliv žížal je přitom dvojitý. Žížaly mají jednak okamžitý efekt související zejména se zvýšením dostupnosti živin. Za druhé mají vliv dlouhodobý, spočívající v tvorbě půdních agregátů a tvorbě půdy jako takové. Tento vliv přetrvává, i když žížaly z půdy odebereme. V iničiálních stádiích sukcese, když jsou půdy nevyvinuté, jsou významnější dlouhodobé vlivy, naopak u vyvinutých půd v pozdějších fázích sukcese jsou významnější vlivy okamžité¹⁴. Žížaly neovlivňují jen rostliny, ale mění i složení celé půdní potravní sítě¹⁶. Před kolonizací žížalami je půdní potravní síť dominována půdními houbami a organismy, které je konzumují, zejména půdní mesofaunou. S příchodem žížal dojde k zapracování organické hmoty z povrchu do minerální půdy a do půdních agregátů. To podporuje potravní síť dominovanou bakteriemi a dalšími organismy, které se na nich živí. Tato změna potravní sítě ovlivňuje i rostliny. Před kolonizací ploch žížalami jsou půdy zcela prorostlé ektomykorhizními houbami žijícími v symbióze s pionýrskými druhy dřevin. Manipulační pokusy s podzemní a nadzemní kompeticí ukázaly, že podzemní kompetice, zejména kompetice mezi ektomykorhizními houbami stromů a arbuskulárními mykorhizami pozdně sukcesních rostlin je významným faktorem omezujícím nástup pozdně sukcesních druhů rostlin. Další manipulační pokusy¹⁷ pak ukázaly, že žížaly mohou zvýhodňovat arbuskulární houby v kompetici s ektomykorhizními houbami, a tak opět přispívá k nástupu pozdně sukcesních bylin. Z výše popsaných příkladů opět vidíme, že interakce mezi rostlinami a půdou jsou často do značné míry zprostředkovány půdními organismy. Některé tyto vlivy jsou přitom dlouhodobé a zanechávají svou stopu, i když už zde jejich původce být nemusí.



LITERATURA:

1. Bartuška M, Frouz J. Carbon accumulation and changes in soil chemistry in reclaimed open-cast coal mining heaps near Sokolov using repeated measurement of chronosequence sites. *Eur J Soil Sci.* 2015;66(1):104-111.
2. Vindušková O, Frouz J. Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: a quantitative review. *Environ Earth Sci.* 2012;69(5):1685-1698.
3. Frouz J, Vinduskova O. Soil Organic Matter Accumulation in Postmining Sites: Potential Drivers and Mechanisms. In: Muñoz MÁ, Zornoza R, eds. *Soil Management and Climate Change" Effects on Organic Carbon, Nitrogen Dynamics, and Greenhouse Gas Emissions.* Elsevier Academic Press; 2018.
4. Vindušková O, Pánek T, Frouz J. Soil C, N and P dynamics along a 13 ka chronosequence of landslides under semi-natural temperate forest. *Quat Sci Rev.* 2019;213:18-29.
5. Frouz J. Effects of Soil Development Time and Litter Quality on Soil Carbon Sequestration: Assessing Soil Carbon Saturation with a Field Transplant Experiment along a Post-mining Chronosequence. *L Degrad Dev.* 2016;28(2):664-672.
6. Frouz J, Livečková M, Albrechtová J, et al. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites. *For Ecol Manage.* 2013;309:87-95.
7. Vindušková O, Frouz J. Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: a quantitative review. *Environ Earth Sci.* 2013;69(5):1685-1698.
8. Vesterdal L, Schmidt IK, Callesen I, Nilsson LO, Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *For Ecol Manage.* 2008;255(1):35-48.
9. Frouz J, Špaldonová A, Fričová K, Bartuška M. The effect of earthworms (*Lumbricus rubellus*) and simulated tillage on soil organic carbon in a long-term microcosm experiment. *Soil Biol Biochem.* 2014;78:58-64.
10. Angst G, Mueller CW, Prater I, et al. Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass. *Commun Biol.* 2019;2(1):441.
11. Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma.* 2018;332:161-172.
12. Darwin C. *The Formation of Vegetable Mould Through the Action of Worms, with Observations on Their Habits.* John Murray; 1881.
13. Frouz J, Prach K, Pižl V, et al. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *Eur J Soil Biol.* 2008;44(1):109-121.
14. Mudrák O, Frouz J. Earthworms increase plant biomass more in soil with no earthworm legacy than in earthworm-mediated soil, and favour late successional species in competition. Jones H, ed. *Funct Ecol.* 2018;32(3):626-635.
15. Roubíčková A, Mudrák O, Frouz J. Effect of earthworm on growth of late succession plant species in postmining sites under laboratory and field conditions. *Biol Fertil Soils.* 2009;45(7):769-774.
16. Frouz J, Thébault E, Pižl V, et al. Soil Food Web Changes during Spontaneous Succession at Post Mining Sites: A Possible Ecosystem Engineering Effect on Food Web Organization? Amaral LA, ed. *PLoS One.* 2013;8(11):e79694.
17. Frouz J, Moradi J, Püschel D, Rydlová J. Earthworms affect growth and competition between ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal plants. *Ecosphere.* 2019;10(5):e02736.