

Živá půda 9. Cyklus uhlíku a půdní organická hmota

Již v úvodním dílu (Živa 2020, 1) jsme zdůraznili, že klíčovou složkou a základem každé půdy je organická hmota. Její význam pro společenstva půdních organismů a pro průběh fyzikálně-chemických a biologických procesů v půdě je nenahraditelný, „čistě minerální“ půda nemůže existovat a fungovat. Opakovaně a v různých souvislostech jsme se proto věnovali produkci, rozkladu a přeměně organických látek v půdě. V předchozí části jsme se zaměřili na interakce mezi společenstvy půdních organismů a rostlinami a připomněli jsme, že hlavním zdrojem organické hmoty jsou sloučeniny uvolňované rostlinami do půdního prostředí za jejich života a látky z mrtvé biomasy rostlin. Nyní si přiblížíme význam uhlíku pro život na Zemi obecně a v půdě zvláště, a to, jakým způsobem zasahují do přeměn uhlíkatých látek a cyklu uhlíku půdní organismy.

Význam a rozšíření

Základ života na Zemi představuje uhlík, který je tak ústředním prvkem veškeré biomasy, všech organických látek. Uhlíkaté látky jsou předmětem nepřetržitého množ-

ství transformací – od buněčné přes ekosystémovou až po globální úroveň. Cyklus uhlíku je neodlučitelně spojen se životem a smrtí: během života a růstu se akumulují v nejrůznějších i velmi složitých látkách

v biomase a po odumření je v procesech rozkladu a mineralizace uvolňován v jednoduchých uhlíkatých sloučeninách.

Na Zemi se vyskytuje ve formě 7 izotopů, z nichž dva jsou stabilní (^{12}C a ^{13}C) a ostatní radioaktivní (^{10}C , ^{11}C , ^{14}C , ^{15}C a ^{16}C), s poločasem rozpadu od 0,74 s (^{16}C) do 5 726 roků (^{14}C). Naprostá většina uhlíku v prostředí (téměř 99 %) je izotop ^{12}C a přibližně 1,1 % připadá na izotop ^{13}C . Kromě stabilních izotopů má větší význam pouze ^{14}C (využívá se např. k určování stáří fosilních nebo archeologických vzorků radiokarbonovou metodou datování). Uhlík se vyskytuje jako prvek (minerály grafit, diamant) i ve sloučeninách, a to hlavně v uhlíčitanech. Jde o nestálé, obvykle druhotné nerosty, v přírodě se vyskytují zejména uhlíčitany dvojmocných kovů (Ca, Mg, Fe, Mn, Cu aj.). Významným horninotvorným nerostem je kalcit (uhlíčan vápenatý, CaCO_3), tvořící ve formě vápence celé horské masivy, a dále např. siderit (FeCO_3), magnezit (MgCO_3), doloomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), aragonit (CaCO_3) nebo malachit ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) a rodochrozit (MnCO_3). Další formou, v níž se uhlík hojně vyskytuje, jsou plyny: oxid uhlíčitý (CO_2), metan (CH_4), oxid uhelnatý (CO) aj. Kromě toho je součástí obrovského množství organických sloučenin. Jeho průměrný obsah v zemské kůře se však odhaduje na 320 ppm C (ppm = part per million, v tomto případě v hmotnostním vyjádření), což řadí uhlík k prvkům s nejnižší koncentrací vůbec. Je zastoupen také ve formě uhlí (amorfní uhlík) a ropy (uhlovodíky). Ačkoli se může vyskytovat ve sloučeninách s oxidačním číslem +4 až -4, nejběžnější je C^{4+} v uhlíčitanech a CO_2 .

Globální bilance

Nejvíce uhlíku je v zemské kůře vázáno v organických látkách (zemní plyn, ropa, bitumeny, kerogen) a ve zmíněných uhlíčitanech; hlavní aktivní rezervoáry na Zemi jsou ale atmosféra, oceány, suchozemská biosféra a půda. Pro globální cyklus tohoto prvku je charakteristický přenos mezi suchozemskými ekosystémy a oceány a atmosférou. Atmosféra představuje velký aktivní zásobník uhlíku. Ve formě CO_2 se z ní nepřetržitě odčerpává a váže fotosyntézou v nové biomase autotrofních organismů (obr. 2).

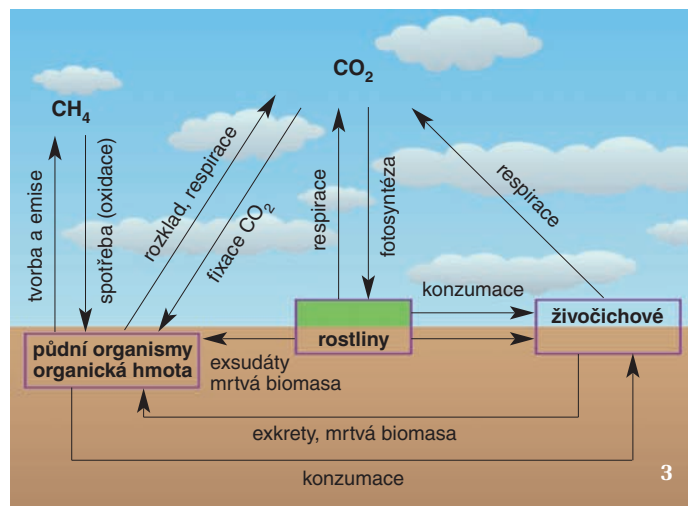
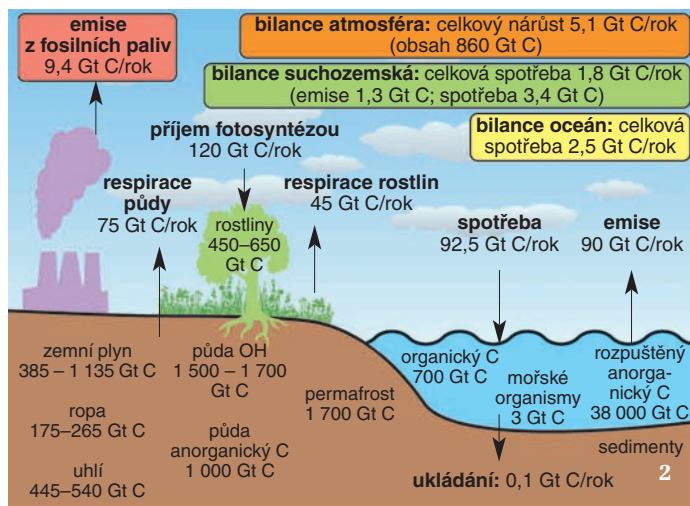
● Vedle CO_2 obsahuje atmosféra také CH_4 , CO, dimetylsulfid ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$), sirouhlík (CS_2) a ve stopových množstvích mnoho vyšších uhlovodíků i jiných uhlíkatých plynů a látek. Přesná měření koncentrace plynů v atmosféře prokazují jednak sezonní kolísání koncentrace CO_2 , jednak stále

1 Hlavním zdrojem uhlíkatých látek a půdní organické hmoty v suchozemských ekosystémech jsou rostliny.

V agroekosystémech je sice část biomasy plodin odnesena ve formě produktů, ale část biomasy může zůstat na poli. Pro žádoucí průběh biologických procesů je velmi důležité tuto „zbytkovou“ biomasu do půdy zapravit a tím ji využít pro podporu společenstev půdních organismů. Taková péče se projevuje i na výnosech následných plodin a celkově na všech podstatných funkcích půdy.

Foto R. Vácha





2 Schéma globálního cyklu uhlíku na Zemi. Množství v jednotlivých rezervoárech je uvedeno v gigatunách (Gt; Gt = Pg = 10^{15} g). Uvedené schéma je pouze jedním z možných, různí autoři odhadují zásoby i přenosy C odlišně. V základních rysech se ale shodují, včetně „přebytku“ globální bilance v posledním období v rozsahu asi 3–5 Pg C/rok, který se projevuje nárůstem množství C v atmosféře. Upraveno podle: W. H. Schlesinger (2002) a S. Killops a V. Killops (2005), údaje podle posledních dostupných globálních odhadů, viz P. Friedlingstein a kol. (2020)

3 Propojení cyklu uhlíku v půdě s atmosférou prostřednictvím CO_2 . Primární autotrofní producenti (zde rostliny) poutají CO_2 fotosyntézou ve své biomase. Po mnoha transformacích se uhlík vrací do atmosféry, z velké většiny ve formě CO_2 , ale i ve formě CH_4 coby výsledek rozkladu organické hmoty za nedostatku kyslíku. Velká část přeměny probíhá v půdě a sedimentech. Upraveno podle: J. D. Van Elsas a kol. (2006), viz H.-P. Blume a kol. (2016)

rostoucí obsah; to platí i pro další plyny včetně metanu. Globální průměrná koncentrace CO_2 nad hladinou světového oceánu přesáhla podle údajů Národního úřadu pro oceán a atmosféru (NOAA, USA, www.noaa.gov) v r. 2016 hranici 400 ppmv (ppmv = parts per million by volume, tedy miliontina objemově) a ke konci r. 2020 byla téměř 415 ppmv. Celkový obsah uhlíku v ovzduší ve formě CO_2 se odhaduje na 750–900 Pg C (petagram, P = 10^{15}). Přibližně 1 % atmosférické části cyklu C připadá na metan. Jeho současná průměrná koncentrace v atmosféře dosahuje kolem 1,8 ppmv, což představuje celkový obsah v ovzduší přes 3 Pg C. Oxidací metanu a dalšími procesy se tvoří oxid uhelnatý. Jeho atmosférická koncentrace kolísá mezi 0,05 a 0,20 ppmv, celkový obsah v ovzduší je 0,2 Pg C. Obsah uhlíku v atmosféře ve formě dalších sloučenin se odhaduje na 0,05 Pg C. Z uhlíkatých sloučenin v atmosféře tedy značně převažuje CO_2 .

● Uhlík v oceánech se vyskytuje ve čtyřech hlavních formách: rozpuštěný anorganický, rozpuštěný organický, organický v detritu a částicích a v biomase organismů. Podle různých odhadů se ve formě rozpuštěných organických látek nachází 700

Tab. 1 Hlavní zásobníky a toky uhlíku na Zemi podle údajů v 90. letech 20. století. Globální odhady jsou zde přepočítány na plochu 1 ha nebo 1 m^2 a na atmosféru nad ní. Podle: údaje Mezinárodního panelu pro změnu klimatu (IPCC), viz H. H. Janzen (2004)

Zásobník nebo tok	Globální odhady pro pevninu (Pg C, resp. Pg C/rok)	Plocha 1 ha pevniny (Mg C, resp. Mg C/rok)	Plocha 1 m^2 pevniny (kg C, resp. kg C/rok)
CO_2 v atmosféře	760	15	1,5
poutání fotosyntézou	60	4	0,4
respirace půdy	60	4	0,4
zásoba v rostlinné biomase	500	40	4
zásoba v půdě (do hloubky 1 m)	100	100	10

Pozn.: Soudobé zdroje podpořené mnoha experimentálními údaji odhadují respirační zemědělské nebo lesní půdy na 25–30 kg CO_2 , tedy asi 6 kg C/ha/den, což by odpovídalo 2,2 Mg C/ha/rok ($M = 10^6$), hodnotě velmi přibližně (řádově) stejné (4 Mg C) jako vychází z přepočtu globálních údajů v tabulce. V přepočtu na m^2 jsou průměrné emise z půdy 2,5–3 g CO_2 , tj. 0,6 g C za den (0,22 kg C/rok), v objemovém vyjádření 1,3–1,5 l CO_2 denně.

až 1 500 Pg C, zatímco ve formě rozpuštěných anorganických látek přes 36 000 Pg C. Z tohoto množství připadá na povrchové vrstvy vody, v nichž především se odehrává cyklus uhlíku a jeho výměna mezi atmosférou a hydrosférou, „pouze“ asi 900 Pg C. Oceány tedy hrají zásadní roli v globálním cyklu C a v jeho (dynamické) rovnováze. V povrchových vrstvách vody dochází činností fotoautotrofních organismů k fixaci uhlíku z anorganických forem a tvoří se organické uhlíkaté látky. Důsledkem reakcí a asimilace uhlíku v povrchových vrstvách oceánů je mírně zvýšené pH a snížená salinita.

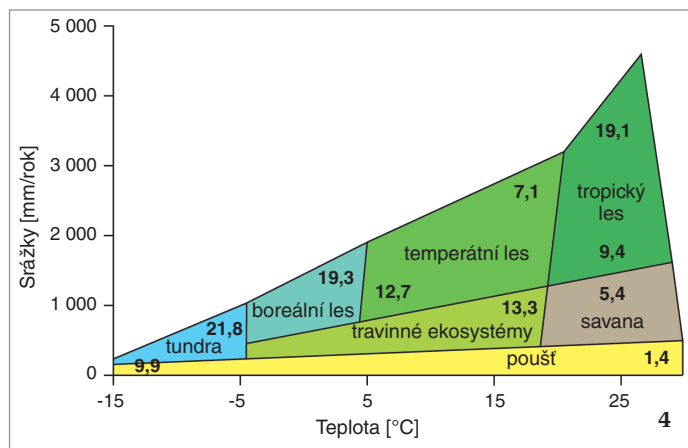
● Uhlík v suchozemských ekosystémech je akumulován v půdě a rašelině, v opadu, jiných zbytcích rostlin a živočichů a v jejich biomase. Mezi suchozemskými ekosystémy a atmosférou existuje velká výměna uhlíku, a to zejména prostřednictvím CO_2 (obr. 2 a 3), metanu a v podstatně menší míře i dalších uhlíkatých sloučenin. Cyklus uhlíku v suchozemských ekosystémech je podrobněji uveden dále. Největší množství uhlíku ze všech hlavních zásobníků je obsaženo v litosféře, a to ve formě organických látek a uhlíkatých, jak je již uvedeno výše.

Terestrická biosféra je podle soudobých respektovaných údajů (Friedlingstein a kol. 2020) čistým spotřebitelem CO_2 : produkuje kolem 0,9–2,3 Pg CO_2 -C/rok, ale současně spotřebovává 2,5–4,3 Pg CO_2 -C/rok. Lidské aktivity, hlavně spalování fosilních paliv a průmyslová výroba, produkují

v současnosti asi 8,9–9,9 Pg C/rok; v oceánech se váže kolem 1,9–3,1 Pg C/rok. Výsledkem odhadu globální bilance CO_2 platným pro dekádu 2010–19 je podle citovaných autorů nárůst o 5,1 Pg C/rok v atmosféře, což odpovídá zvyšování atmosférické koncentrace CO_2 o přibližně 3 ppmv ročně; o něco starší odhady uváděly roční atmosférický nárůst množství uhlíku kolem 3–4 Pg (blíže obr. 2).

Cyklus uhlíku v suchozemském ekosystému

Na vzájemně provázaný souhrn přeměn uhlíku (cyklus uhlíku; lze jej vztáhnout na různé vymezené ekosystémy i na celou ekosféru) lze pohlížet jako na cyklus života, v globálním měřítku zabezpečující svou kontinuitu na Zemi. Jednou z nejdůležitějších složek tohoto cyklu je CO_2 . Fotosyntézou je uhlík z CO_2 transformován do organických látek, které jsou dříve nebo později (při průchodu potravními řetězci a sítěmi) respirací rozkládány zpět na CO_2 . Část uhlíku je přitom dočasně (byť relativně dlouhodobě) vázána ve formě humusu v půdách, který se však posléze také rozkládá, a vzniklý CO_2 doplňuje zásobu uhlíku v atmosféře. Tato „respirace půdy“ v globálním měřítku několikrát převyšuje současné emise CO_2 ze spalování fosilních paliv: viz obr. 2, respirace 75 (podle jiných odhadů až 81) Pg C versus 9,4 Pg C/rok; respiraci půdy a rostlin ovšem vyrovnává stejně velké nebo větší odčerpávání CO_2 z atmosféry fotosyntézou. Globální údaje



tundra	mráz, anoxie, pomalé cykly, ECM
boreální les	mráz, anoxie, pomalé cykly, oheň, ECM
travinné ekosystémy	různá úrodnost, herbivorie, fixace N ₂ , ekosystémoví inženýři, AM
temperátní les	různá úrodnost, herbivorie, ekosystémoví inženýři, EM, AM
tropický les	rychlé cykly, fixace N ₂ , ekosystémoví inženýři, AM
savana	sucho, spásání, oheň, fixace N ₂ , ekosystémoví inženýři, AM
poušť	velmi pomalé cykly, mineralizace

jsou těžko představitelná velká čísla, proto může být užitečné přepočítat je na hektar nebo metr čtvereční plochy (tab. 1). Malé množství CO₂ v půdě reaguje za vzniku H₂CO₃ a uhličitanu a může se z půdy v této formě vymývat. Biotické zdroje CO₂ v půdě zahrnují respiraci autotrofních i heterotrofních organismů. Rostliny spotřebovávají CO₂ z atmosféry při fotosyntéze a část vracejí do půdního vzduchu a do atmosféry respirací kořenů. Průměrný podíl respirace kořenů na celkově uvolňovaném CO₂ z půdy je asi 50 % a možný rozsah činí 10–90 %.

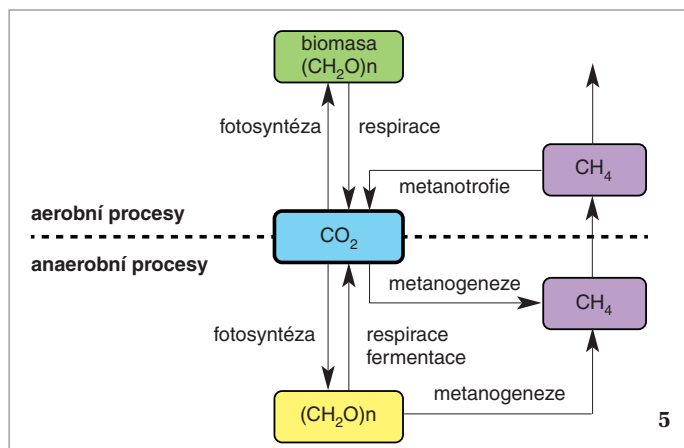
V některých suchozemských ekosystémech je mineralizace organických látek zpomalena, a tak se zde organická hmota hromadí. Typickým příkladem jsou mokřady a podobné ekosystémy s převládajícími anoxickými poměry nebo půdy v polárních oblastech, kde jsou kvůli nízkým teplotám a krátké vegetační sezoně nepříznivé poměry pro rozklad organické hmoty (obr. 4).

Kromě CO₂ mohou v procesech rozkladu organických látek za anoxických podmínek vznikat i další uhlikaté sloučeniny, a to zejména metan (obr. 5, také obr. 3). Z hlediska celkového koloběhu uhlíku jsou tyto látky minoritní. Metan uvolňovaný z půdy do atmosféry však hraje důležitou úlohu ve fyzikálně-chemických procesech v atmosféře, kde vedle CO₂ a N₂O působí jako jeden z hlavních tzv. skleníkových plynů. Na produkci metanu se podílejí přirozené procesy i lidská činnost. Z těch prvních je nejvýznamnější tvorba metanu anaerobními mikroorganismy v anoxických prostředích v půdách a sedimentech, v trávicích trakttech živočichů aj. Emise související s lidskou činností jsou však několikanásobně vyšší. Největší podíl připadá na rýžová pole, spalování biomasy a fosilních paliv a na tvorbu a emisi CH₄ v trávicích trakttech hospodářských zvířat. Významné jsou také emise ze skládek odpadů a z odpadních vod. Metan je naopak spotřebováván např. v půdách temperátních lesů, které jsou relativně

provzdušněné, a tedy příznivé pro oxidaci metanu metanotrofními bakteriemi. Podle různých odhadů je v současnosti celková produkce metanu na Zemi 500–610 Tg CH₄/rok (Tg = teragram, 10¹² g) a celková spotřeba o něco nižší, takže nárůst v atmosféře je zhruba 10–30 Tg CH₄/rok (Horwath 2015).

Původ půdní organické hmoty

Půdní organickou hmotu v širším smyslu (také organický podíl půdy) tvoří půdní organismy (včetně biomasy kořenů rostlin, viz dále) a různé organické látky; někdy se ale živé organismy do ní nezahrnují. Jejím hlavním zdrojem (obr. 6) jsou autotrofní organismy, vytvářející organické látky z anorganických sloučenin s využitím světelné energie (fotoautotrofní rostliny, řasy, sinice a některé další bakterie) nebo chemické energie (chemoautotrofní mikroorganismy). Druhým zdrojem organických látek jsou zbytky hoření, uhlíky a saze. Vzhledem k tmavé barvě se nazývají „černý uhlík“ (black carbon). Tyto látky mohou být v dané půdě primárním zdrojem, jestliže se dostávají do půdy odjinud (i z velmi vzdálených míst přenosem atmosférou), nebo sekundárním zdrojem po místních požárech. V některých ekosystémech, kde jsou požáry víceméně pravidelné a časté, může černý uhlík tvořit až 60 % organického uhlíku v půdě. O významu uhlíkových fragmentů v půdách a sedimentech pro zkoumání historie lesních porostů již bylo v Živě pojednáno (např. 2021, 2: 60–64). Dalším zdrojem je atmosféra, z níž mohou i stopová množství organických sloučenin „vychytávat“ heterotrofní mikroorganismy, tedy některé bakterie a zejména houby. Tento zdroj může být významný např. na živinově chudých substrátech v iniciačních fázích vzniku a vývoje půdy. Depozice organických sloučenin mohou být malým, ale pravidelným zdrojem těchto látek v mnoha ekosystémech, a to – díky přenosu atmosférou – nejen v průměrných oblastech se znečištěným ovzduším. Nepravidelným zdrojem v dané půdě



4 Zásoba organického uhlíku (kg C/m²) v hlavních biomech s charakteristickou průměrnou roční teplotou a průměrným ročním úhrnem srážek. Pro lesy mírného pásu (temperátní les) jsou uvedeny údaje pro teplé (nižší hodnota) a chladné (vyšší) podmínky, pro tropický les údaje pro vlhké (vyšší) a suché (nižší) podmínky. V dolní části obr. jsou uvedeny typické poměry v biomech (EM = ektomykorrhiza, ECM = erikoidní mykorrhiza, AM = arbuskulární m.; ekosystémoví inženýři – zejména žížaly a termiti). Upraveno podle: G. B. deDeyn a kol. (2009), viz D. C. Coleman a kol. (2018)

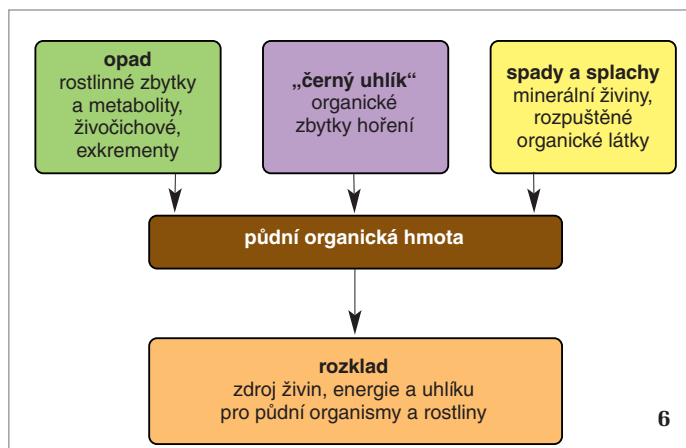
5 Schéma přenosu uhlíku mezi atmosférou a biomasou. Ve formě CO₂ je vázán ve fotosyntéze do organických sloučenin biomasy, odkud se respirací posléze uvolňuje. Metanogenezi může být CO₂ přeměněn na metan, který buď uniká do atmosféry, nebo je zpětně oxidován metanotrofií na CO₂. Metan vzniká i při anaerobním rozkladu organických látek.

6 Zdroje a využití půdní organické hmoty. Zásadním a často řádově zdaleka největším zdrojem je rostlinný opad a zbytky rostlin včetně kořenů a kořenových exsudátů. Půdní organická hmota

mohou být i splachy z okolí a záplavy, případně závlahová voda.

Množství organických látek každoročně vstupujících do půdy je různé a závisí mimo jiné na klimatických podmínkách a na vegetaci. Zatímco přísun z nadzemních částí rostlin je relativně dobře znám, přísun ve formě kořenových exsudátů a odumlých kořenů je ve většině případů značně nejistý. Odhaduje se, že se tak do půdy dostává průměrně asi 20–50 % (podle některých autorů někdy až 80 %) uhlíku fixovaného ve fotosyntéze. V minulém dílu jsme připomněli významné zastoupení biomasy kořenů v celkové bilanci organické hmoty – dosahuje jedné tuny suché biomasy na hektar v suchých savanách a až přes 100 t/ha v temperátních a tropických lesích a může tvořit 15–90 % celkové biomasy rostlin; roční produkce kořenů je u travních porostů kolem 5 t/ha, v listnatých lesích 2–9 t/ha a v jehličnatých lesích 1–11 t/ha.

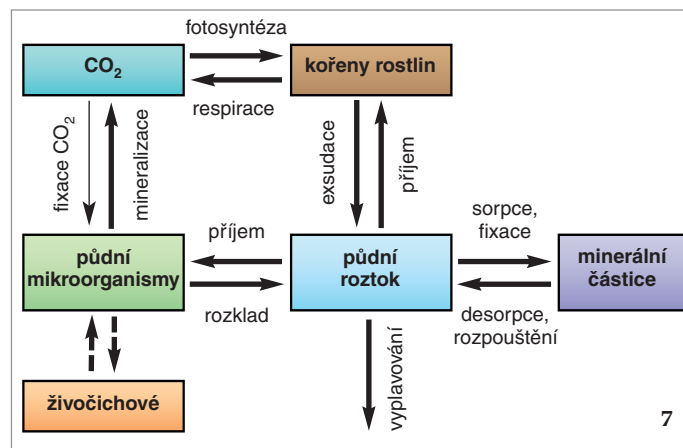
Organické látky vstupující do půdy mají různý původ a formu. Můžeme je dělit na rostlinné, živočišné a mikrobiální (a antropogenní v případě spadlých xenobiotických látek). Největší podíl mrtvé biomasy před-



slouží po svém rozkladu jako zdroj živin autotrofním organismům, ale zejména je zdrojem uhlíku a energie pro heterotrofní organismy. Upraveno podle: R. E. White a kol. (1992), viz S. Ellis a A. Mellor (1995)

7 Hlavní toky vodorozpusťných a v půdě pohyblivých forem uhlíku a jeho zásobníky v půdě. Schéma nezahrnuje půdní organickou hmotu a kumulaci uhlíku v hůře dostupných formách ani postupný rozklad komplexnějších organických látek. Hlavním zdrojem labilních a dostupných uhlíkatých sloučenin jsou v půdě kořeny rostlin. Produkují rozpustné jednodušší organické látky ve formě kořenových exsudátů, které stimulují společenstva půdních organismů a biologickou aktivitu (jež vede ke zvýšenému uvolňování živin pro rostliny). Po mineralizaci organických látek se uhlík vrací ve formě CO_2 a dalších plynů do atmosféry, odkud byl rostlinami odčerpán. Část organických látek z exsudátů nebo z rozložené biomasy je (dočasně) vázána v půdních částicích, jiné mohou být vyplaveny. Část uhlíku z biomasy využijí půdní živočichové. Upraveno podle: D. L. Jones a kol. (2003), viz D. C. Coleman a kol. (2018)

stavuje v naprosté většině půd odumřelá rostlinná hmota. Menší, avšak nezanedbatelný podíl tvoří mrtvá těla živočichů a mikroorganismů a produkty jejich metabolismu. Organické látky včetně odumřelé biomasy obsahují mnoho vázaného uhlíku (suchá rostlinná biomasa průměrně 42 hmotnostních %), kyslíku (42 %), vodíku (8 %) a dalších prvků včetně dusíku, síry aj. (celkem 8 %). Rostlinná biomasa je tvořena velkým množstvím různých organických látek. Ve značné míře jsou zastoupeny nejrůznější sacharidy, od monosacharidů, jako je např. glukóza, až po polysacharidy typu celulózy, hemicelulóz (xylan aj.) a škrobu. Zejména ve starších rostlinných pletivech se vyskytuje lignin. Biomasa dále tvoří bílkoviny, tuky, vosky a další organické sloučeniny. Živočišná biomasa je podobně jako u rostlin tvořena z asi 75 hmotnostních % vodou. Významnou složku těl půdních bezobratlých představuje chitin z kutikuly. Jde o polysacharid podobného složení jako celulóza; obsahuje ale kromě převažujícího podílu uhlíku i relativně velké množství dusíku v aminoskupinách, a tak přispívá k obhacení půdy tímto limitujícím prvkem.



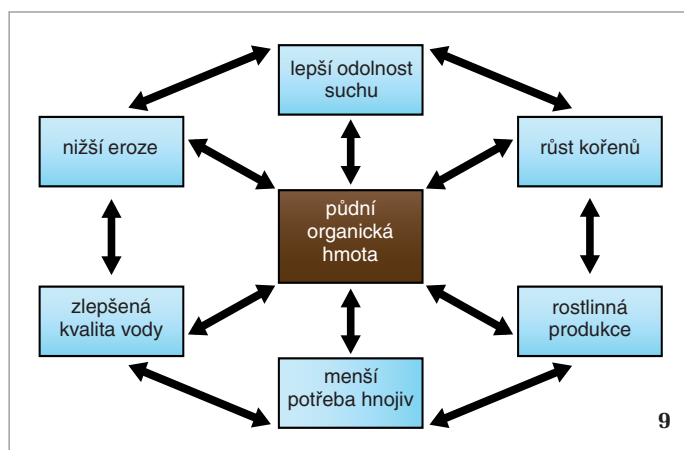
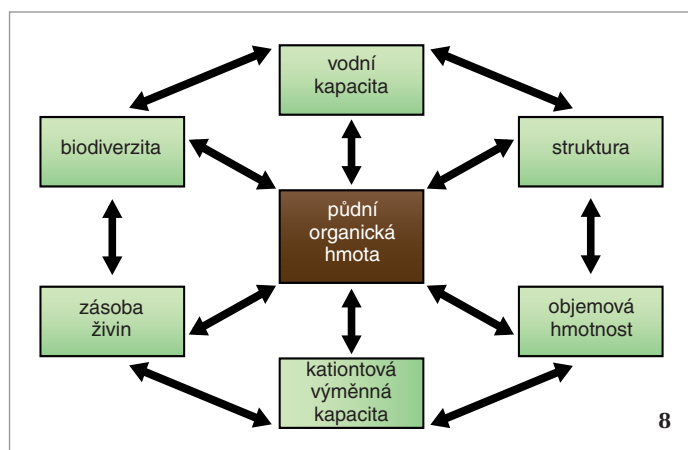
Tab. 2 Globální zásoba suchozemského organického uhlíku (Pg C ; $\text{P} = 10^{15}$, jeden Pg odpovídá miliardě tun) v půdě a v nadzemní biomase rostlin podle klimatických regionů. V tropickém mokřém a vlhkém regionu je nadpoloviční většina uhlíku obsažena v rostlinné biomase, v ostatních je více uhlíku uloženo v půdě; extrémní jsou z tohoto pohledu boreální a polární regiony, v nichž se přes 93 % uhlíku nachází v půdě. Jiné zdroje mohou uvádět podobné nebo odlišné odhady globálních zásobníků (např. obr. 2). Upraveno podle: J. P. W. Scharlemann a kol. (2014), viz H.-P. Blume a kol. (2016). V závorkách jsou uvedena % z regionu.

Klimatický region	Půda: svrchní vrstva do 30 cm	Půda: spodní vrstvy	Půda celkem	Rostlinná biomasa	Region celkem
tropický mokřý	62,6	65,4	128,0 (47,7)	140,2 (52,3)	268,1
tropický vlhký	78,6	72,3	150,9 (49,9)	151,7 (50,1)	302,6
tropický suchý	67,3	69,0	136,2 (76,2)	42,5 (23,8)	178,7
tropický horský	29,6	26,5	56,1 (58,1)	40,5 (41,9)	96,6
temperátní teplý vlhký	33,3	29,7	63,0 (68,7)	28,7 (31,3)	91,7
temperátní teplý suchý	38,9	39,6	78,5 (79,4)	24,2 (23,6)	102,7
temperátní chladný vlhký	104,1	106,2	210,3 (88,1)	28,5 (11,9)	238,8
temperátní chladný suchý	52,2	50,0	102,2 (91,8)	9,1 (8,2)	111,3
boreální vlhký	162,0	194,7	356,7 (93,8)	23,5 (6,2)	380,2
boreální suchý	32,0	37,0	69,1 (93,1)	5,1 (6,9)	74,2
polární vlhký	30,6	21,7	52,4 (96,0)	2,2 (4,0)	54,5
polární suchý	8,0	4,3	12,3 (96,2)	0,5 (3,8)	12,8
celkem	699,3	716,4	1 415,7 (74,0)	496,6 (26,0)	1 912,2

Kromě živočišné biomasy je ve větším množství obsažen i v biomase hub. Co se týká prvků, obsahují těla živočichů oproti rostlinám větší podíl dusíku vázaného v aminokyselinách tvořících bílkoviny a také obsah některých mikroživin bývá jiný. Mikrobiální biomasa se obsahem vody a prvků příliš neliší od makroorganismů a patří většinou k labilní složce půdní organické hmoty, která může být rychle využita jinými organismy, a tedy rozložena. Ani mikrobiální biomasa však není homogenní, některé její části, např. buněčné stěny, odolávají rozkladu déle, zatímco jiné, které tvoří asi většinu biomasy, jsou relativně dobře rozložitelné. Přispívá k tomu i poměrně nízký poměr uhlíku a dusíku v mikrobiální biomase ($\text{C} : \text{N}$ bývá 4 až 9 : 1). Mikroorganismy během života také produkují různé snadno rozložitelné látky, např. ve formě mukopoly-

sacharidů tvořících ochranný obal jejich buněk, které absorbují a kumulují vodu a tak zabraňují jejich vysychání.

Labilní látky produkované rostlinami zahrnují především kořenové exsudáty obsahující rozpustné monosacharidy, aminokyseliny, organické kyseliny a další (obr. 7). Kyseliny napomáhají zvětvávání hornin a uvolňování jinak nedostupných forem minerálních živin, zejména fosforu, z povrchů minerálních částic a zpřístupňují tak tyto živiny rostlinám a mikroorganismům. Labilní složky biomasy jsou obsaženy i v rostlinných pletivech, např. ve formě monosacharidů produkovaných fotosyntézou, a slouží jako zdroj energie i jako základní složka pro tvorbu strukturních látek. Tyto látky, např. celulóza, hemicelulóza a lignin, pak představují rekalcitrantní složky, které mnohem hůře podléhají rozkladu.



Tab. 3 Obsah organického uhlíku v půdě, jeho vstupy, celková zásoba a rychlost obratu v půdě v hlavních biomech Země. Upraveno podle: W. Horwath (2015), na základě různých zdrojů

Biom	Obsah organického C [kg C/m ²]	Vstupy C do půdy [kg C/m ² /rok]	Celková zásoba C v biomu [Pg C]			Rychlost obratu [rok]
			rostliny	půda	celkem	
tropický prales	12	2,03	340	692	1 032	5,3
les mírného pásu	8,7	0,85	139	262	401	6,2
boreální les	16,4	0,5	57	150	207	9,5
tropická savana	5,4	0,48	79	345	424	15,9
travní porost mírného pásu	13,3	0,3	23	172	195	25,4
středozemní typ porostu	7,6	0,46	17	124	141	16,7
poušť	3,4	0,08	10	208	218	10,1
tundra	19,6	0,1	2	400	402	52,3
orná půda	7,9	0,48	4	248	252	6,3
mokřad	72,3	0,17	15	450	465	945
celkem	–	–	686	3 051	3 737	–

Obsah uhlíku a organické hmoty v půdě

Odhady množství uhlíku v anorganické a organické formě v půdě se však značně liší. V půdách je vázáno 2 300 Pg C (viz obr. 2) v organických látkách, respektovaná americká publikace uvádí obsah 2 400 Pg C (bez povrchového opadu), z čehož asi dvě třetiny jsou ve vrstvě půdy do hloubky 1 m (Brady a Weil 2014). Podle jiných autorů je v půdách asi 1 200 Pg C (Moore 1988, citováno v Pierzynski a kol. 2000), 1 416 Pg C (viz tab. 2), nebo dokonce 3 051 Pg C (Horwath 2015, tab. 3). Novější odhady pro nezaledněnou pevninu uvádějí globální zásobu organického uhlíku 1 325 až 1 500 Pg C (do hloubky 1 m), 2 300 Pg C (do 3 m) a 3 000 Pg C v celém půdním profilu (např. Lorenz a Lal 2018).

Kromě organických sloučenin najdeme v půdě uhlík i v anorganických látkách, zejména v uhličitanech. N. C. Brady a R. R. Weil (2014) uvádějí celkový obsah v půdě v této formě 940 Pg C. W. Horwath (2015) udává 748 Pg C do hloubky půdy 1 m a K. Lorenz a L. Lal (2018) zmiňují zásobu 700 až 1 700 Pg anorganického C ve svrchní vrstvě půd (do 1 m). Bez ohledu na rozdíly v jednotlivých odhadech se v půdách vyskytuje větší množství uhlíku, než je v biomase rostlin a živočichů a v atmosféře dohromady.

Povrchové vrstvy většiny minerálních půd obsahují přibližně několik hmotnostních procent organických látek: na 1 kg suché půdy to bývá 20–50 g, na 1 m² (podle typu půdy a její hloubky) asi 4–50 kg (viz tab. 3). Přesné stanovení obsahu orga-

nické hmoty však není jednoduché, zejména kvůli rozmanitému původu a formě organických látek. Vesměs se proto stanoví obsah organického uhlíku a ten se násobí dohodnutým koeficientem, jenž nejčastěji činil 1,724, i když se nyní zdá pravděpodobnější 1,9–2,0. Výsledek pak udává přibližný obsah organické hmoty v půdě. Obecně se tento obsah snižuje směrem do hloubky půdního profilu, ovšem i z tohoto pravidla existují výjimky.

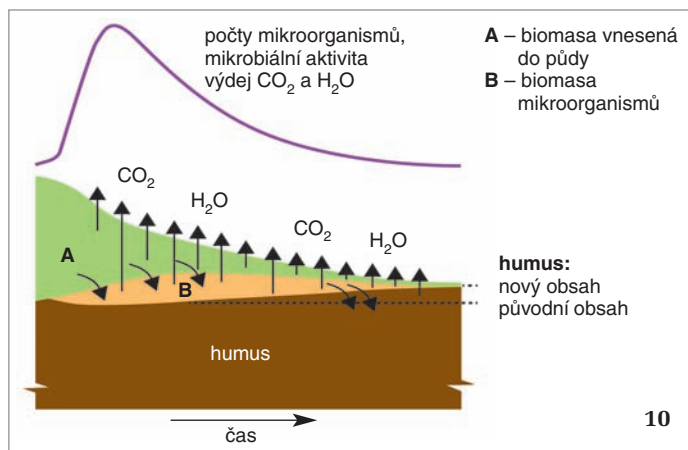
Množství organické hmoty (a tedy uhlíku) v půdě je ovlivněno velikostí vstupů a mnoha faktory, z nichž největší význam mají teplota a srážky (obr. 4). Vyšší teploty vedou k rychlejšímu rozkladu organických látek a k nižšímu obsahu půdní organické hmoty. Vyšší vlhkost půdy znamená v jinak srovnatelných podmínkách vyšší obsah organické hmoty. Zamokřené půdy se špatnou aerací mají obvykle více organické hmoty než půdy dobře provzdušněné. Hromadění i rozklad organické hmoty jsou dále závislé na převládající vegetaci – např. půdy s travními porosty většinou obsahují mnohem více organické hmoty než lesní porosty. Vliv má i textura půdy, těžší půdy většinou zadržují více organické hmoty než lehčí půdy. Výrazně může působit kultivace půdy, což je zvlášť markantní u panenských půd, tedy vyvinutých v přirozených ekosystémech, které se začínou obdělávat. Počáteční, obvykle vysoký, obsah organické hmoty se zde rychle snižuje.

Organická hmota ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půd mnohem více,

8 a 9 Vztah mezi půdní organickou hmotou a dalšími důležitými charakteristikami a funkcemi půdy. Půdní organická hmota přímo i nepřímo ovlivňuje např. strukturu půdy, její schopnost zadržovat vodu i početnost a rozmanitost společenstev půdních organismů (biodiverzitu), pro něž je zdrojem uhlíku a energie. Obsah a vlastnosti půdní organické hmoty určují objemovou hmotnost půdy, její chemické vlastnosti včetně kationtové výměnné kapacity a zásobu živin pro rostliny i mikroorganismy (obr. 8). Půdní organická hmota zajišťuje větší odolnost vůči suchu a erozi a má řadu dalších funkcí včetně poskytování různých ekosystémových služeb (9). Upraveno podle: Ch. W. Rice a kol., viz J. M. Kimble a kol. (2019)

10 Postup rozkladu biomasy. Jestliže se do půdy dostane větší množství rostlinné biomasy, mikroorganismy ji rychle osídlí a rozkládají. Tato fáze je doprovázena nárůstem počtu i biomasy mikroorganismů a indikuje ji tvorba a uvolňování značného množství CO₂. Po vyčerpání dobře dostupné „potravy“, tedy snadněji

než by odpovídalo jejímu relativně nízkému zastoupení v půdě (obr. 8 a 9). Většinou na ni připadá třetina i více celkové kationtové výměnné kapacity a její obsah a kvalita zásadně ovlivňují stabilitu půdních agregátů a schopnost půdy zadržovat vodu. Mnoho půdních organických látek tvoří komplexy s různými kovy, přičemž organická látka je donorem elektronů a vzniklé komplexní sloučeniny se nazývají cheláty. Cheláty jsou většinou přístupnější pro mikroorganismy a rostliny než kovy v iontové podobě, mají tedy velký význam v přísunu mikroživin i v (nežádoucím) přenosu těžkých kovů do biomasy. Pro většinu půdních mikroorganismů je organická hmota hlavním zdrojem energie a živin. Určitý obsah organické hmoty je pro dobrou funkci půdy, např. z hlediska pěstování plodin, nezbytný. Obecně však neplatí, že vyšší obsah organické hmoty je vždy výhodnější nebo lepší pro danou půdu a naopak. Záleží také na složení organické hmoty, tedy na její kvalitě, a na vzájemné souhře všech ostatních fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy. Někdy se lze setkat s tvrzením, že pokles obsahu organického uhlíku pod 2 hmotnostní % (obsah půdní organické hmoty pod ca 3,4 %) negativně ovlivňuje strukturu půdy a její další



rozložitelných organických látek, začne množství i biomasa mikroorganismů klesat. Látky z jejich odumírajících buněk jsou ihned využívány jinými mikroorganismy a tyto procesy opět doprovází uvolňování CO₂ a dalších metabolitů. S tím, jak se množství rozložitelné organické hmoty v systému snižuje, klesá i aktivita mikroorganismů, až se vrátí na úroveň blízkou před vnesením organické látky (biomasy) do půdy. Malá část uhlíku původní rostlinné biomasy může být vázána v biomase mikroorganismů a určitá část byla přeměněna na organické látky relativně odolné rozkladu (humus). Upraveno podle: N. C. Brady a R. R. Weil (2014)

11 Zemědělské půdy v České republice zabírají přibližně 55 % výměry státu. Jejich převážná většina trpí dlouhodobě nedostatečným přísunem organických látek. Hlavní příčinou je malá produkce organických hnojiv kvůli nízkým stavům hospodářských zvířat. To vede k poškozování půd a snižování jejich kvality i schopnosti zajišťovat dostatečnou produkci potravin. Foto M. Šimek

vlastnosti. Pro takový předpoklad však není dostatečně věrohodný kvantitativní důkaz (viz např. Loveland a Webb 2003).

Rozklad organických látek

Na tomto hlavně biologickém procesu se podílí většina půdních organismů; význam jednotlivých skupin (živočiškové, rostliny, mikroorganismy) i jednotlivých populací je ale v každé půdě a v každém čase jiný. Živočiškové významně přispívají nejvíce na počátku, a to jak narušením odumřelých tkání a pletiv, tak trávicími pochody. Obvykle vykusují měkčí části listů a jiných orgánů, které obsahují převážně celulózu, hemicelulózu, labilní sacharidy a dusík v bílkovinách, ale také mikroorganismy, které listy napadají ihned po opadu (viz Živa 2021, 2: 80, obr. 7). Biomasa odumřelého listu je po průchodu trávicím traktem ochuzena o labilní složky, a vyprodukované exkrementy tak představují hůře rozložitelnou formu organické hmoty. Tvrdší části listů (žilnatina) s vysokým procentem ligninu a exkrementy ochuzené o labilní složky zůstávají v půdě, kde jsou napadeny bakteriemi a hlavně houbami, které mají enzymatický aparát vybavený pro rozklad složitějších látek včetně ligninu. Za hlavní rozkladače jsou považovány (heterotrofní) mikroorganis-

my – větší organické molekuly rozkládají extracelulárně (do prostředí vylučovanými enzymy), zatímco menší molekuly (organické kyseliny, cukry aj.) mohou přijímat do buněk svých těl a přímo využít v metabolismu. Za příznivých podmínek proběhne rozklad odumřelé biomasy, a tedy třeba celého listu, až na CO₂ (obr. 10).

Připomeňme si ještě jeden zajímavý jev, který se nazývá anglickým termínem priming effect. Mnohokrát bylo experimentálně pozorováno, že po přidavku čerstvé organické hmoty (substrátu) do půdy následuje buď zvýšení, nebo naopak snížení rychlosti rozkladu půdní organické hmoty a tím i produkce CO₂ z půdy, a to v závislosti na množství dodané organické hmoty. Půdní organická hmota většinou obsahuje pouze malé množství labilního uhlíku, který může sloužit jako dostupný zdroj energie pro heterotrofní mikroorganismy. Proto se rozkládá poměrně pomalu a rychlost jejího rozkladu dále klesá se snižujícím se obsahem labilního uhlíku. Přísun čerstvé organické hmoty, např. ve formě nového opadu nebo kořenových exsudátů, představuje nový zdroj energie pro půdní mikroorganismy ve formě snadno dostupného (labilního) uhlíku. Podobný efekt může způsobit např. zorání půdy, které vede ke zpřístupnění jinak nedostupných organických látek, které se nacházejí v anaerobních mikroprostředích. Mikroorganismy pak mají dostatek energie nejen pro rozklad čerstvé, ale i pro rozklad stávající půdní organické hmoty. Ta totiž oproti čerstvé hmotě obsahuje relativně velké množství dusíku (má nízký poměr C a N), a proto je jeho cenným zdrojem pro mikroorganismy. Bylo zjištěno, že pokud k půdě přidáme méně uhlíku, tedy množství odpovídající maximálně 15 % obsahu C v mikrobiální biomase, bude následovat lineární nárůst rozkladu půdní organické hmoty a tedy i produkce CO₂; kromě CO₂ z přidaného substrátu se navýší i produkce CO₂ z půdy a jde tedy o pozitivní priming effect. Pokud však přidáme množství uhlíku vyšší než množství odpovídající asi 50 % obsahu uhlíku v mikrobiální biomase, bude následovat exponenciální pokles produkce CO₂, nebo dokonce pokles až do negativních hodnot, uvolňování CO₂ z půdy bude tedy nižší než v půdě bez přidavku uhlíku (negativní priming effect). Podle toho, zda se půdní organická hmota skutečně rozkládá, nebo ne, rozlišujeme dva typy tohoto procesu. Skutečný priming effect nastane, pokud mikrobiální biomasa

po přidavku labilního substrátu začne rozkládat i samotnou půdní organickou hmotu. Jestliže však dojde k produkci CO₂ jen díky aktivaci a obratu mikrobiální biomasy bez dalších změn v půdní organické hmotě, hovoříme o zdánlivém efektu. Jednotlivé půdy se podle obsahu uhlíku liší ve velikosti tohoto efektu. Půdy s nízkým obsahem většinou mají silnou kladnou odezvu na přísun labilního uhlíku, zatímco půdy s dostatkem uhlíku už příliš velkou odezvu na přidávek nevykazují. Detaily a souvislosti tohoto jevu však zatím čekají na své odhalení (více např. Kuzyakov a kol. 2000).

Produkty rozkladu a nové syntézy

Rozklad organických látek samozřejmě není výlučně procesem přeměny uhlíku a tvorby CO₂ a CH₄. Uvolňuje se při něm mnoho minerálních živin pro rostliny i mikroorganismy: dusík (ve formě NH₄⁺ a posléze NO₃⁻), síra, fosfor, kationty jako Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ aj. Proto se také proces rozkladu organických látek vedoucí ke vzniku anorganických (minerálních) forem nazývá mineralizace. Uvolňované minerální látky jsou buď bezprostředně využívány mikroorganismy a rostlinami jako živiny, nebo se adsorbují na půdních koloidech, odkud mohou být později opět uvolněny a využity jako živiny, nebo tvoří nerozpustné minerální sloučeniny, případně se z půdy vyplavují. Odhaduje se, že v přirozených ekosystémech připadá na recyklované rostlinné živiny více než 90 % potřeby dusíku a fosforu a více než 70 % potřeby vápníku a draslíku; v agroekosystémech je odebírána podstatná část živin v biomase produktů, a proto je třeba minerální živiny doplňovat hnojením (Chapin a kol. 2002, viz Lorenz a Lal 2018).

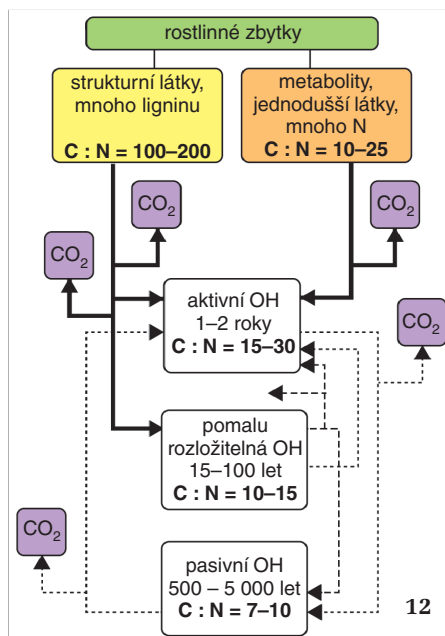
Navzdory pokroku v analytické instrumentaci je poznání přeměn půdní organické hmoty neúplné. Zásadní překážku představuje skutečnost, že organické sloučeniny jsou v půdě vázány na povrchu minerálních částic. Pro účely studia chemické struktury bylo proto až donedávna nutné jejich převedení do roztoku za použití silných extrakčních činidel, např. 0,5 M NaOH, což vedlo ke vzniku artefaktů a následně (ke zřejmě mylné) představě, že finálním produktem rozkladu a resyntézy látek v půdě je humus reprezentovaný fulvokyselinami, humusovými kyselinami a huminem (viz dále). Velkou komplikací pro lepší poznání je i složitá struktura a značná různorodost organických látek,

znemožňující jejich identifikaci. Významným omezením je dále skutečnost, že klíčovým parametrem v procesu rozkladu organické hmoty je vzájemné prostorové uspořádání minerálních částic, organických látek a mikroorganismů.

V průběhu rozkladu je organická hmota oxidována na minerální látky. Mineralizaci doprovází imobilizace uvolněných živin, které slouží k tvorbě nové biomasy rozkladných mikroorganismů; pokud je dané živiny relativně dostatek, bude v půdě k dispozici také rostlinám a jiným mikroorganismům. Pokud jí není dost, je přednostně imobilizována v mikrobiální biomase a rostliny mohou trpět jejím nedostatkem. Typicky k takové situaci dochází např. po zapravení slámy a jiných podobných (minerálně chudých) substrátů do půdy – při rozkladu je k dispozici relativně mnoho uhlíku, ale relativně málo dusíku a jiných minerálních živin. To jednak zpomaluje samotný rozklad, jednak nedochází k uvolnění minerálních živin pro potřeby rostlin.

Podle tradiční představy je výsledkem rozkladu a resyntézy látek v půdě směs nazývaná humus, jehož vznikem se zabývá řada teorií; podle některých je významnou sloučeninou v procesech humifikace lignin, který reaguje s ostatními produkty rozkladu za vzniku makromolekul tvořících humus. Pro optimální průběh humifikace se zřejmě musejí střídát fáze aerobní (rozkladná, biologické procesy) a anaerobní (syntetická, fyzikálně-chemické procesy) a dále je nutné příznivé chemické prostředí (půdní reakce blízká neutrálním hodnotám, dostatek vápenatých kationtů apod.). Starší chápání humusových látek jako typických makromolekul, jejichž veškeré součásti jsou pevně spojeny kovalentními vazbami a lze hovořit o makromolekulách s určitým stupněm polymerace a s určitou molekulovou hmotností, je však v současné době opouštěno. Ve světle novějších poznatků jsou termíny jako humusové kyseliny, fulvokyseliny, humin apod. považovány za pojmy operační, spojené s postupem extrakce humusových látek, nikoli termíny chemické, jak ještě zdůrazníme níže. Novější teorie předpokládá, že humusové látky nejsou obrovské polymery, ale že jde o supramolekulární asociace malých molekul, tedy o útvary vzniklé spojením relativně malých organických molekul slabými silami (van der Waalovy síly, pí vazby, vodíkové můstky), které jsou vytvořeny v takovém množství, že se tyto útvary chovají jako velké molekuly (Piccolo a Conte 2000, Piccolo 2002). Uvedená teorie je v současnosti podpořena výsledky rozborů za použití pokročilých analytických technik. Humus však může být definován i jako složitá směs rezistentních hnědých a tmavě hnědých amorfních a koloidních organických látek charakteru kyselin, která vzniká mikrobiálním rozkladem a syntézou a má chemické a fyzikální vlastnosti velmi důležité pro rostliny a půdu (Ponge 2003). Humusové látky se klasifikují různým způsobem, podle různých hledisek (přehledně viz např. Šimek a kol. 2019).

Na tomto místě je zajímavé připomenout knihu S. A. Waksmana (Humus. Origin, Chemical Composition and Importance for



12 Třídění půdní organické hmoty podle rozložitelnosti a typický poměr C : N různých frakcí. Půdní organická hmota (OH) se může dělit na aktivní (labilní), půdními mikroorganismy relativně lehce metabolizovatelnou hmotu, na pomalu rozložitelnou (rekalitrantní) a na pasivní či inertní, tedy velmi pomalu rozložitelnou organickou hmotu. Jednotlivé složky mají typický poměr C : N a dobu rozkladu. Především mikrobiálními i chemickými procesy jsou půdní organické látky přeměňovány z jedné formy na jinou. Všechny přeměny doprovází uvolňování (ztráty) uhlíku ve formě CO_2 a někdy CH_4 . Celkově se takto ve formě plynů uvolní více než dvě třetiny uhlíku z rozkládaného materiálu. Upraveno podle: K. Paustian a kol. (1992), viz N. C. Brady a R. R. Weil (2014)

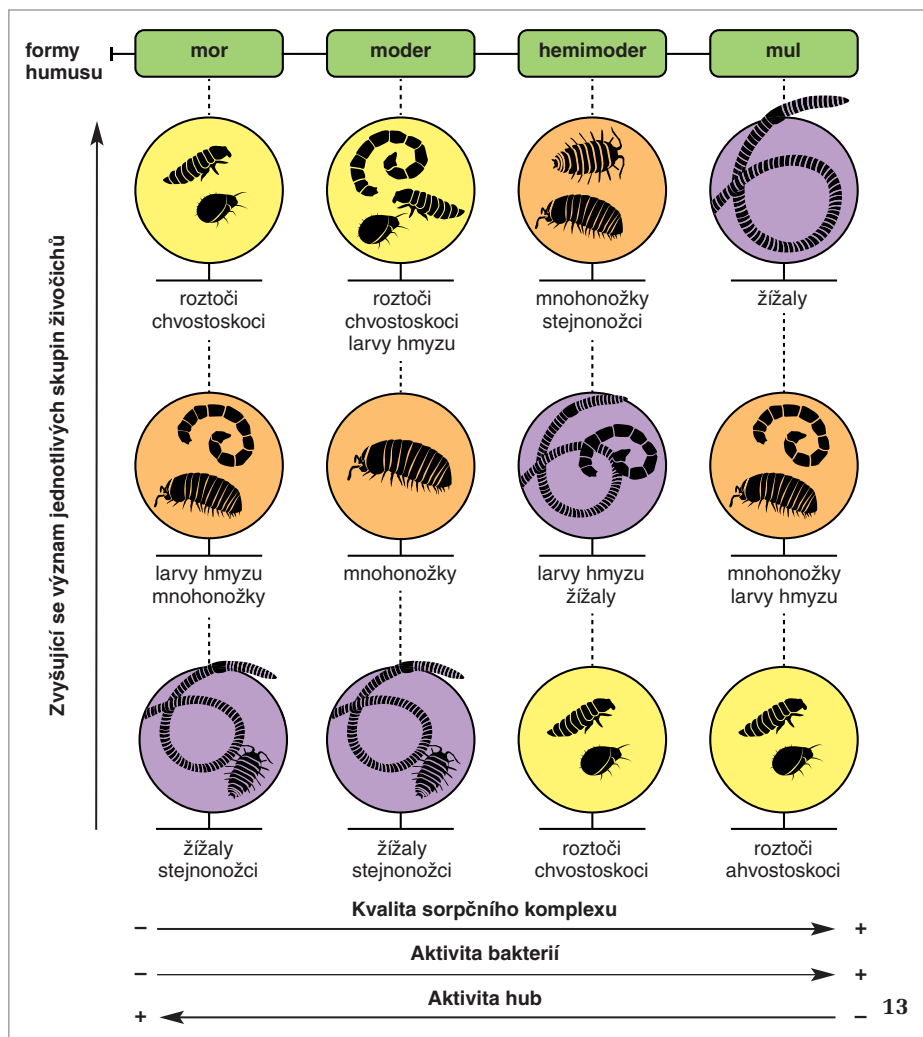
Nature), ve které v r. 1936 shrnul výsledky rešerše zahrnující 1 311 publikací týkajících se humusu, sepsaných v různých jazycích během několika století.

Ačkoli byl Waksman původně zastánce zavedené alkalické extrakce humusových látek z půdy, tehdy změnil názor a uvádí, že tento postup „nedává pravdivý obraz humusu, jeho podstaty a přeměny v půdě“. Experimentální omezení pak vysvětlují překvapující skutečnost, že se ani za více než 80 následujících let nepodařilo vytvořit obecně přijímaný model rozkladu a přeměn organické hmoty v půdě. Podle teorie diskutované v posledních přibližně 15 letech je směr a rychlost tohoto procesu výslednicí více faktorů, jejichž vliv se v jednotlivých fázích rozkladu mění. Zatímco chemická struktura hraje významnou roli na počátku, z hlediska perzistence organické hmoty je rozhodující její stabilizace vazbou na minerální částice a ochrana před mikrobiálním atakem v půdních agregátech. Během rozkladu organických látek dochází k jejich oxidaci, což zvyšuje jejich sorpční schopnosti, přičemž sorpce je nahlížena jako vratný proces. Na počáteční fázi rozkladu se podílejí zejména mikroorganismy s r-růstovou strategií, preferující vyšší koncentrace labilních organických sloučenin, v pozdější

fázi se uplatňují pomalu rostoucí K-strategové, adaptovaní na využití složitých organických látek. Typické zástupce K-strategů představují např. bakterie z kmenů *Acidobacteria* nebo *Verrucomicrobia*, ačkoli ztotožnění růstové strategie s určitými taxonomickými skupinami je pouze orientační. Předpokládá se, že každá organická molekula je rozložitelná, pokud je dostupná mikroorganismům vybaveným potřebným enzymatickým aparátem. Naopak i jednoduchá organická sloučenina může přetrvávat dlouhou dobu v půdě intaktní, pokud tato podmínka není splněna, případně aktivita mikroorganismů je omezena, např. nedostatkem kyslíku, některé minerální živiny nebo nízkou teplotou. V této souvislosti je důležité poznamenat, že mikroorganismy zauímají méně než 1 % objemu půdy a jejich rozmístění je značně nerovnoměrné. Dekompozice organické hmoty v uvedeném pojetí není na rozdíl od humifikační teorie primárně funkcí chemické struktury, ale funkcí ekosystémovou. Nový pohled na transformaci organické hmoty se odráží i v analytickém přístupu, aktuálně se před chemickou frakcionací dává přednost fyzikální metodě, která lépe reflektuje funkce půdní organické hmoty. Charakteristickým znakem postupného rozkladu organických látek je jejich relativní obohacení dusíkem – zatímco např. rostlinné zbytky mají poměr C : N kolem 40 : 1 (20–30 : 1 u bobovitých, až 100 : 1 v případě slámy obilnin), v částečně přeměněných látkách je poměr mnohem nižší. Tímto způsobem vázaný dusík je vesměs nepřístupný jako živina, ale může být posléze uvolněn. Biomasa mikroorganismů má poměr C : N mezi 4–9 : 1. Nižší poměr indikuje relativně více dusíkatých látek (bílkovin) a je charakteristický pro bakterie, poměr kolem 9 : 1 je typický pro mikromycety. Poměr C : N v organické hmotě v půdě se pohybuje v rozsahu 8–15 : 1 a nejčastěji činí 10–12 : 1 (obr. 12).

Sekvestrace uhlíku v půdě

Půdní organický uhlík je největším zásobníkem tohoto prvku v terestrických ekosystémech, a proto mají půdy velký význam z hlediska uchování fixovaného uhlíku a zabránění jeho úniku do atmosféry, tedy pro jeho sekvestraci – dlouhodobé vyčlenění z „normálního“ cyklu biologicky aktivních forem C. Uhlík je v půdách uchovávan v různých formách lišících se dostupností organismům, a tedy náchylností k rozkladu (obr. 12). Během procesů rozkladu a stabilizace dochází k syntéze různých komplexů organických sloučenin s velmi pevnými vazbami, avšak ochranu před dalším rozkladem získávají organické látky možná hlavně obalením minerálními částicemi při tvorbě agregátů nebo vazbou na minerální částice. Tyto procesy zajišťují nedostupnost a odolnost vůči rozkladu. Organická hmota obsažená v agregátech je od okolního prostředí oddělena fyzikální bariérou, neboť póry mezi minerálními částicemi jsou příliš malé, aby jimi prošli živočišové i větší mikroorganismy, ale je také chráněna anaerobním prostředím, které v agregátech často vzniká a účinně zpomaluje mikrobiální rozklad. V průběhu rozkladu se orga-



nická hmota navíc stává hůře dostupnou, neboť se v ní snižuje obsah labilního uhlíku a zbývající organické látky jsou pro půdní organismy méně atraktivní. V kombinaci s vazbou a ochranou uvnitř agregátů nebo na minerální částice to z ní činí téměř nerozložitelnou, inertní složku. Sekvestraci uhlíku v půdě lze podpořit jednak omezením ztrát organické hmoty z půdy (mineralizací, erozí), jednak zvýšenou dodávkou organické hmoty do půdy. Problémem je, že kvalitních organických hnojiv je u nás nedostatek, což způsobují mimo jiné nízké stavy dobytka a nízká produkce chlévské mrvy a dále nedostatek vhodných surovin pro výrobu kompostů. Skutečnost, že již desítky let se do našich zemědělských půd dodává méně než polovina potřeby organické hmoty, je velmi alarmující. Prohlubuje to degradaci půd a bohužel zlepšení není v nejbližší době reálné (obr. 11).

Formy nadložního humusu lesních půd

Na povrchu půd, jejichž svrchní vrstva se nepromíchává orbou a dalšími agrotechnickými zásahy jako na půdách zemědělských, se někdy vytvářejí více či méně mocné horizonty nadložního humusu (nadložní organické horizonty). Jejich tvorba je proto jedním ze základních specifíků lesních půd. Jde o významnou součást lesních ekosystémů s největší biodiverzitou a biologickou aktivitou, s nejvýraznější dynamikou přeměn organických látek a živin a s velkou hustotou kořenů, ovlivňovanou zejména typem vegetace, a tedy

13 Výskyt a relativní význam různých skupin edafonu v půdě ve vztahu k hlavním formám humusu. (Pozn.: hemimoder je některými autory vyčleňován jako přechod mezi mulem a moderem, bez H horizontu, tedy rostlinných zbytků v silném stupni rozkladu. Blíže v textu.) Upraveno podle: J.-M. Gobat a kol. (2004)

i množstvím a kvalitou opadu. Ty určují rychlost a charakter rozkladných procesů i kvalitu výsledných produktů. Rychleji se rozkládá hmota trav a bylin, pomaleji opad listnatých dřevin, nejpomaleji obvykle kyselý opad jehličnanů. Různorodé podmínky stanoviště a působení řady přírodních i antropogenních faktorů dávají vznik různým typům nadložního humusu. Základní formy lze zhruba rozlišit podle stupně biologické aktivity: vysoká aktivita vede k tvorbě formy mul, přechodná forma se nazývá moder a v půdě s nízkou aktivitou je mor. Tyto tři formy nadložního humusu bývají zpravidla odlišeny na základě morfologických znaků – přítomnosti, mocnosti a kvality tří typických organických horizontů, nazývaných opad (L) – relativně čerstvý opad bez známek rozkladu, drť (F) – částečně rozložené zbytky, původ u většiny hmoty je rozemnatelný, měl (H) – rostlinné zbytky v silném stupni rozkladu, převládá humifikovaná hmota.

● Mor, někdy též označovaný jako surový humus, je charakteristický přítomností všech tří humusových horizontů (L, F, H),

přičemž v typické formě mají přibližně stejnou mocnost a jsou od sebe ostře odděleny. V moru probíhá rozklad organických zbytků velmi pomalu (za nižších teplot, vyšších srážek a na chudém geologickém podloží, v kyselých podmínkách), a tak mohou být zbytky původního opadu viditelné i po desítkách let. Organominerální horizont A bývá málo mocný (obvykle do 2 cm), místy může i chybět. Z živých organismů dominují houby, činnost zoedafonu je omezena, žížaly nejsou přítomny. Právě malá přítomnost a nízká aktivita půdních živočichů je důvodem ostrého rozhraní mezi horizonty – kvůli ní totiž nedochází k promíchávání materiálu. Mor se vyskytuje nejčastěji pod jehličnatými porosty, zvláště v horských polohách, typicky především u půdních typů podzol a kryptopodzol.

● Moder je forma humusu, v níž se organické zbytky akumulují v menší míře než u moru, neboť je zachována vyšší aktivita půdní fauny i půdních mikroorganismů s dominantním zoogenním rozkladem v horizontu drti. Z půdních bezobratlých bývají zastoupeni členovci, méně žížaly. Rozklad probíhá pomalu, vrstva humusu je silná. Ve většině případů se vyskytuje i horizont měli, který není zcela ostře oddělen od horizontu A (rozdíl oproti moru). Je to typická forma humusu smíšených lesů, ale i významné části jehličnatých lesů, na půdách typů kambizem, luviszem aj.

● Mul je charakteristický rychlou přeměnou organických zbytků na homogenní humifikovanou hmotu, která se snadno zapracovává níže do minerální vrstvy půdy zejména činností půdních živočichů. Zpravidla se tvoří na teplejších a přiměřeně vlhkých stanovištích bohatých na živiny. V lesích ho můžeme nalézt ve smíšených a listnatých porostech. Je typický pro černoze a aluviální půdy (černice, fluvizem) s neutrálním pH, může ale vznikat i v kyselých půdách, kdy je většina rozkladu opadu zajištěna houbami tzv. bílé hniloby. V podmínkách mírného pásu dominují při tvorbě mulu žížaly, v tropických a subtropických podmínkách termiti. Tito živočišné účinně přemísťují rozkladaný a rozložený materiál do půdního horizontu A, který je velmi dobře vyvinutý, bývá mocnější než 10 cm, tmavé až černé barvy. Morfologicky se mul projevuje horizontem opadu různé mocnosti, malou mocností horizontu drti a fakultativně horizontem měli, který ale může i zcela chybět. Relativní význam jednotlivých skupin půdních organismů, jež se podílejí na vzniku hlavních forem humusu, je znázorněn na obr. 13.

V posledním dílu si přiblížíme význam půdních organismů v koloběhu dalších důležitých biogenních prvků, především dusíku, fosforu, síry a draslíku.

Příspěvek vznikl s podporou programu Strategie AV21 Záchrana a obnova krajiny.

Seznam použité literatury je uveden na webové stránce Živý.