

Rostliny, které se živí houbami

Představu, že rostliny jsou výhradně fotosyntetizující organismy, narušuje několik výjimek – jednu představují zelení i nezelení haustorioví paraziti (např. zárazy – *Orobancha*, kokrhele – *Rhinanthus*). Organický uhlík, jímž si přilepšují k vlastní fotosyntéze nebo jím fotosyntézu plně nahrazují, získávají z cévního systému kořenů jiných rostlin (blíže viz Živa 2010, 5: 204–207 a 2011, 3: 105–107). Další skupinou jsou druhy získávající uhlík z hub kolonizujících jejich kořeny – jde o rostliny mykoheterotrofní, s nimiž jste se v Živě mohli seznámit již dříve (např. 2010, 5: 204–207). Současné výzkumy navíc ukazují, že fenomén mykoheterotrofní je častější, než se předpokládalo. V následujícím článku proto objasníme, jak se nezelené mykoheterotrofní druhy živí v různých zeměpisných šířkách, jak je tento způsob výživy rozšířen mezi některými zelenými lesními rostlinami a jak se tyto strategie vyvinuly v evoluci rostlin.

Mykoheterotrofní rostliny

Od počátku 19. stol. vyvolával kontroverzní názory způsob výživy jedné z lesních nezelených rostlin – hniláku smrkového (*Monotropa hypopitys*, syn. *Hypopitys monotropa*, z čeledi vřesovcovitých – *Ericaceae*). Jeho druhové jméno však není příliš na místě, jelikož kořeny se sice proplétají s kořeny jehličnanů, ovšem jejich přímé spojení pozorováno nebylo. V průběhu vášnivých debat byla začátkem 40. let 19. stol. objevena jemná vlákna spojující kořeny hniláku s kořeny jehličnanů. Anglický botanik Thomas Ryland pak ukázal, že jde o vlákna hub kolonizující kořeny, podle něj „bez zásadní role“.

Rylandovo pozorování představuje jednu z prvních zmínek o přítomnosti hub na kořenech rostlin. Dnes již víme, že tato symbióza, popsaná r. 1885 Albertem Bernardem Frankem (působil na zemědělské univerzitě v Berlíně) jako mykorhiza, je velmi častá. U více než 80 % druhů rostlin nalezneme vlákna půdních hub kolonizující povrchová pletiva kořenů a tvořící smíšený orgán, mykorhizu. V r. 1881 navrhl další německý badatel Franz Kamienski, že tyto houby mohou vyživovat hnilák ze stromů, jejichž kořeny také kolonizují. Roku 1960 tuto teorii prokázal Erik Björkman (Královská lesnická škola, Stockholm) tím, že injikoval cukry značené radioaktivním izotopem uhlíku do mízy okolních jehličnanů a následně zaznamenal přesun radioaktivity směrem k hniláku, ale nikoli k ostatním rostlinám. Hnilák navíc vadl, pokud byla přerušena vlákna hub, jež ho spojovala se stromy.

Hnilák smrkový se tedy stal jednou z prvních rostlin, u níž byla pozorována mykorhiza, avšak tento vztah s houbami u něj nemá obvyklou podobu (viz také Živa 2008, 5: 199–201). Běžně u mykorhizní symbiózy zelených rostlin houba čerpá od rostliny cukry vznikající při fotosyntéze, zatímco rostlina přijímá prostřednictvím hub část vody a minerálních látek. Naproti tomu hnilák získává od hub i cukry. Tento pří-

pad není jediný, přes 500 druhů rostlin z téměř 100 různých rodů se živí obdobně (obr. 1 a 2), přičemž skoro 50 % z nich jsou orchideje (čeleď vstavačovitých – *Orchidaceae*). Jonathan Leake z Univerzity v Sheffieldu ve Velké Británii navrhl v r. 1994 nazývat tyto v dospělosti nezelené rostliny jako mykoheterotrofy.

Identifikace hub asociovaných s mykoheterotrofními rostlinami byla o to obtížnější, že tyto houby často nelze kultivovat *in vitro*. Přitom určování druhů bylo dlouho založeno právě na pozorování morfologických charakteristik hub v kultuře. Až od 90. let 20. stol. můžeme díky rozvoji metod molekulární biologie používat k identifikaci sekvenování úseků DNA. Tak se podařilo potvrdit, že houbovní symbionti mykoheterotrofních rostlin mírného pásu se pojí rovněž s okolními stromy. Ukázalo se mimo jiné, že hnilák spojuje s kořeny stromů čírůvky (*Tricholoma*), a u mykoheterotrofní orchideje hlístníku hnízdáku (*Neottia nidus-avis*) první z autorů článku v r. 2002 odhalil v této roli houby z řádu pokrytkotvaré (*Sebacinales*; obr. 3). Jiná mykoheterotrofní orchidej, korálice trojklaná (*Corallorhiza trifida*), se pojí s houbami z rodu plesňák (*Thelephora*). Vědci z Univerzity v Sheffieldu pak doložili přenos uhlíku z blízkých vrb a bříz do této orchideje. Ukazuje se tedy jedna charakteristická vlastnost – každý mykoheterotrofní druh je specificky propojený s jednou skupinou hub. Naproti tomu v běžných mykorhizních symbiózách se zelená rostlina váže často s několika desítkami, nebo dokonce stovkami různých druhů hub.

Roli hub ve výživě některých rostlin potvrdila i další metoda, založená na tom, že přirozený obsah stabilních izotopů dusíku (^{15}N) a uhlíku (^{13}C) závisí na zdrojích živin. Obecně se mnoho prvků skládá ze dvou a více stabilních či nestabilních (radioaktivních) izotopů. Izotopy se sice shodují v počtu protonů a elektronů, ale liší se počtem neutronů – mají proto různou atomovou hmotnost, a tak se mohou chovat

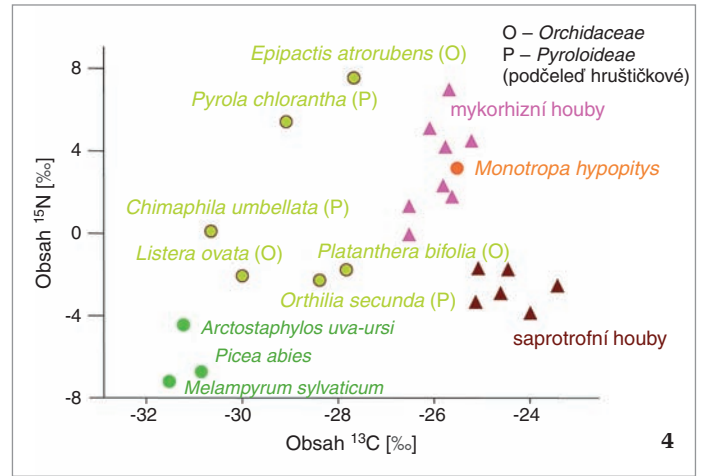


1 Nezelený, plně mykoheterotrofní druh *Sarcodes sanguinea* z čeledi vřesovcovitých (*Ericaceae*) roste v Severní Americe a získává uhlík výlučně od svých mykorhizních hub z rodu kořenovec (*Rhizopogon*), které tvoří mykorhizu i s okolními jehličnany. Foto V. Merckx

2 K mykoheterotrofním rostlinám se řadí *Voyria aphylla* (hořcovité – *Gentianaceae*) vyskytující se v neotropické oblasti. Foto J.-M. Dupont a M. Merdalski

3 Hlístník hnízdák (*Neottia nidus-avis*) – orchidej s krátkými silnými kořeny v útvaru podobném hnízdě. Tyto kořeny kolonizují houby řádu pokrytkotvaré (*Sebacinales*), jež zároveň tvoří mykorhizu s okolními stromy.

4 Při studiu mykoheterotrofní a mixotrofní se využívají stabilní izotopy uhlíku (^{13}C) a dusíku (^{15}N). V grafu lze vidět přibližný obsah ^{13}C a ^{15}N autotrofních rostlin s C3 metabolismem fotosyntézy (zeleně). Přestože ektomykorhizní houby (růžově) získávají část, nebo i veškerý uhlík od fotosyntetizujících rostlin s C3 metabolismem, obsahují oproti nim přibližně o 6 ‰ více ^{13}C ; naopak rostliny získávající velkou část dusíku od mykorhizních hub jsou obsahem ^{15}N chudší. V mutualistické ektomykorhizní symbióze tedy dochází při výměně látek ke změně izotopového složení (zatím neznámým mechanismem). Nezelené mykoheterotrofní rostliny (zde hnilák smrkový – *Monotropa hypopitys*, oranžově) se obsahem stabilních izotopů velmi podobají ektomykorhizním houbám, které pro ně představují zřejmě



jediný zdroj všech živin a na nichž v podstatě parazitují. Mixotrofové (světle zeleně) pak mají hodnoty ¹³C mezi autotrofními a mykoheterotrofními rostlinami v závislosti na podílu autotrofního uhlíku v biomase; tato hodnota se také může lišit podle světelných podmínek. Variabilita v ¹⁵N u mixotrofů není plně objasněna, ale může být způsobena různorodostí jejich symbiontů – mohou se pojit jak výlučně s ektomykorrhizními houbami, tak s ektomykorrhizními a saprotrfními houbami zároveň. Orig. M.-A. Selosse

5 *Wulfschlaegelia aphylla* je tropická orchidej mykorrhizní se saprotrfními houbami. Kvete v období sucha (obr. a). Spleť kořenů se rozrůstá v listové opadance během období deštů (b, svrchní listy nadzvednuty). Kořeny (černá šipka) jsou propojeny s listovým opadem skrze velké množství hyf (c, bílé šipky).

6 Dva exempláře okrotice bílé (*Cephalanthera damasonium*), vpravo albín. Albíní jsou jedinci bez chlorofylu pozorovaní u normálně zelených druhů. U albínů se uplatňuje mykoheterotrofní způsob výživy, u zelených jedinců mixotrofie, kdy fotosyntetizují a zároveň získávají uhlík prostřednictvím mykorrhizních hub. Foto P. Pernot

u rostlin s C3 a C4 metabolismem fotosyntézy (o příčinách rozdílu viz Živa 2010, 1: 7–9), či u saprotrfních a ektomykorrhizních hub, jež získávají živiny různým způsobem. Při výzkumu mykoheterotrofie a mixotrofie (viz dále) se nejčastěji využívají stabilní izotopy uhlíku a dusíku (obr. 4). Od r. 2003 se ukazuje, že mykoheterotrofové obsahují více ¹⁵N a ¹³C než autotrofní rostliny. Naměřené obsahy jsou bližší ektomykorrhizním houbám, což naznačuje, že právě ty představují zdroj živin pro mykoheterotrofní rostliny. Zatím nevíme, jak se uhlík do rostliny dostává. Je možné, že k přenosu dochází přes membrány plně vyvinutých mykorrhizních struktur, podobně jako v arbuskulární mykorrhizní symbióze. Často je ale pozorován jejich rozpad v buňkách kořenů, hlavně u orchidejí, což může značit přenos živin až v této fázi, nebo být pouze důsledkem obnovování poškozených či starých struktur.

Ve všech zeměpisných šířkách

Do r. 2005 převládala představa, že mykoheterotrofní rostliny kolonizují především ektomykorrhizní houby, které zároveň mají symbiotický vztah i se stromy. To však odpovídalo pouze situaci u druhů v mírném pásu. Někteří vědci obrátili pozornost k početným mykoheterotrofním druhům tropických pralesů a našli velmi rozdílné scenáře.

Mykoheterotrofní orchideje rodu *Aphyllorchis* z Thajska, příbuzné hlístníku, rovněž vstupují do symbiózy s ektomykorrhizními

houbami, ale nespécificky – v kořenech jediné orchideje najdeme až 10 druhů hub. Florent Martos z univerzity na Réunionu zase ukázal, že některé tropické mykoheterotrofní orchideje se překvapivě pojí se saprotrfními houbami! Na ostrově Réunion se např. druh *Gastrodia similis* (rostoucí zde ve zbytcích primárního deštného lesa v nižších nadmořských výškách) tvoří mykorrhizu s houbami rodu ostnáček (*Resinicium*), rozkládajícími odumřelé dřevo. Toto pozorování vysvětluje, proč Číňané pěstují na dřevnaté drti příbuznou nezelenou orchidej *G. elata* (její masité oddenky využívají jako pochoutku a v léčitelství), kde dřevnatý materiál rozkládá a rostliny vyživuje houba z rodu václavka (*Armillaria*). Další nezelená orchidej *Wulfschlaegelia aphylla* z ostrova Guadeloupe (Malé Antily v Karibském moři), studovaná F. Martosem, vytváří v období deštů spleť kořenů v listové opadance (obr. 5). Kořenový pletenec následně kolonizují houby rozkládající odumřelé listy, např. z rodů helmovka (*Mycena*), křehutka (*Psathyrella*) a penízovka (*Gymnopus*), i v tomto případě bez výrazné specifity.

U těchto orchidejí jsou obsahy ¹⁵N a ¹³C podobné jako u saprotrfních hub, což je potvrzuje jako zdroj živin. Schopnost tropických saprotrfních hub vyživovat mykoheterotrofii může být dána teplejším a vlhčím klimatem. Houby tak zůstávají pravděpodobně déle aktivní, mobilizují více uhlíku než v našich klimatických podmínkách, a mohou proto uspokojit



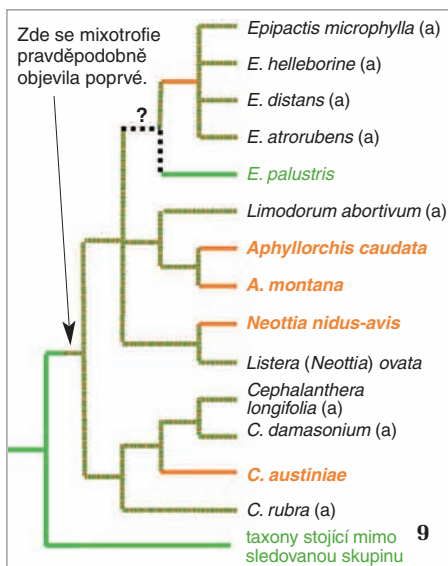
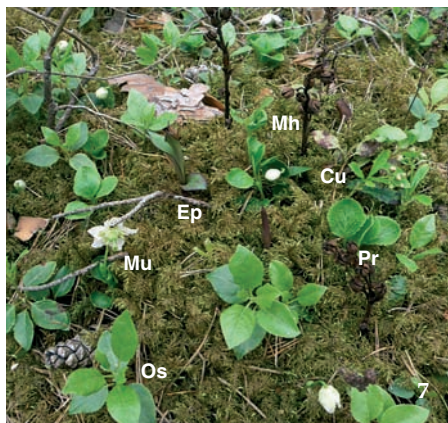
potřeby mykoheterotrofů. V mírném pásu se sušším a chladnějším podnebím mají dostatečný přísun uhlíku pro výživu mykoheterotrofů pouze houby mykorhizní, žijící trvale v symbióze s jinými rostlinami. Nevíme ale, proč se asociace v tropech vyznačují někdy menší druhovou specifičností. Tropické mykoheterotrofní orchideje tedy vykazují netušenou funkční diverzitu. Tropy jsou tak výrazně bohatší nejen počtem druhů, ale zároveň rozmanitostí biologických mechanismů.

Rostliny bez chlorofylu

Vraťme se do mírného pásu, kde houby „živitelky“ tvoří mykorhizu s okolními stromy. Poslední dobou se ukazuje, že mykoheterotrofie se netýká pouze vzácných druhů rostlin bez chlorofylu – u některých zelených lesních orchidejí najdeme i jedince bez chlorofylu (albíny), kteří jsou zcela heterotrofní (obr. 6). Takové mutace se u rostlin objevují relativně často, ale tyto exempláře většinou nepřežívají. Vyšlo najevo, že albíni dýchají (aniž by vázali uhlík) konstantní rychlostí nezávisle na světelných podmínkách, zatímco zelení jedinci s rostoucím osvětlením zvyšují intenzitu fotosyntézy. Albíni jsou tedy heterotrofní a dávají tušit, že zelení jedinci možná také využívají jiné než fotosyntetické zdroje uhlíku. Vědci z Univerzity v Bayreuthu zjistili, že u těchto druhů orchidejí jsou zelené rostliny bohatší na ^{15}N a ^{13}C ve srovnání s autotrofními druhy (obr. 4) a albíni mají v pletivech ještě vyšší obsah těchto izotopů, dosahující hodnot jako u mykoheterotrofů nebo ektomykorhizních hub. Naznačuje to zde skrytý mechanismus: albíni jsou zcela mykoheterotrofní, zatímco zelení jedinci doplňují uhlík z vlastní fotoasimilace uhlíkem od mykorhizních hub. U těchto v dospělosti ne zcela autotrofních rostlin mluvíme o mixotrofii, případně částečné mykoheterotrofii.

Identifikace mykorhizních hub mixotrofních orchidejí odhalila další zvláštnost. Zelené luční orchideje totiž tvoří mykorhizu obvykle se vzájemně nepříbuznými převážně saprotrofními houbami, které souhrnně nazýváme kořenomorky (rhizoktonie). V těchto typických mykorhizách rostliny poskytují uhlík kořenomorkám a ty jim dodávají minerální živiny a vodu. Naproti tomu se mixotrofní orchideje málokdy pojí s kořenomorkami, ale vstupují do mykorhizního vztahu se symbiotickými houbami okolních stromů. Např. okrotice (*Cephalanthera*) bývají většinou vázány na houby rodu plesňák a orchidej hnědenec zvrhlý (*Limodorum abortivum*), druh vzácně se vyskytující i v České republice, vykazuje úzkou vazbu na holubinky (*Russula*). Rod krušík (*Epipactis*) se zase překvapivě pojí s různými mykorhizními houbami, mezi nimiž (i v České republice) dominují lanýže (*Tuber*). V Maďarsku se navíc ukázalo, že se vyskyt krušíků překrývá se známým rozšířením lanýžů. Z toho plyne důležitá skutečnost pro jejich ochranu: zatímco kořenomorky po přesazení orchideje znovu kolonizují půdu, houby mixotrofů nepřežijí přerušení hyf propojujících je se stromy.

Mixotrofie však není omezena výhradně na orchideje. V r. 2007 estonský tým



Leha Tedersooa ukázal, že se týká také hruštiček (*Pyrola*, vřesovcovité). Tyto rostliny se vyskytují hojně v alpských a boreálních lesích, kde často tvoří husté porosty (obr. 7). Obdobně jako příbuzný hnilák se pojí s houbami mykorhizními na okolních stromech a jejich obsahy izotopů ^{15}N a ^{13}C dosahují přechodné hodnoty mezi autotrofy a mykoheterotrofy. Tento poznatek (zpočátku diskutovaný americkými výzkumnými týmy vzhledem k absenci podobných pozorování z jiných míst) později podpořila doplňující měření, kdy se pomocí radioaktivních izotopů prokázal přenos uhlíku z modřínů do japonské hruštičky *P. incarnata*.

Ponaučení z těchto sporů je, že stupeň mykoheterotrofie, který lze spočítat pomocí obsahu ^{13}C , závisí na prostředí. U některých japonských hruštiček a evropských mixotrofních orchidejí zvyšuje silné osvětlení fotosyntézu až na hranici autotrofie.

7 V boreálních lesích najdeme druhově bohaté smíšené porosty miko- i mykoheterotrofů. Všechny druhy na snímku vstupují do symbiózy s různými houbami zároveň mykorhizními na okolních stromech. Cu – zimozelen okoličnatý (*Chimaphila umbellata*), Ep – krušík (*Epipactis*), Mh – hnilák smrkový (*Monotropa hypopitys*), Os – hruštička jednostranná (*Orthilia secunda*), Pr – hruštička okrouhlostá (*Pyrola rotundifolia*), Mu – jednovlétný velevkvetý (*Moneses uniflora*). Snímek: M.-A. Selosse, není-li uvedeno jinak

8 Mykorhizní struktury (klubíčka hyf) v kořenových buňkách pětiprstky (*Gymnadenia*). Mykorhiza vypadá u všech orchidejí podobně a houby nelze identifikovat podle tvaru mykorhizních struktur, spolehlivější určení nabízí sekvenace úseků houbové DNA. Foto T. Těšitelová

9 Ve skupině orchidejí, do níž patří hlístníky (tribus *Neottieae*), se mykoheterotrofní druhy (oranžové) objevily vícekrát. Mixotrofní druhy (černě) jsou velmi hojné a často mezi nimi nacházíme albíny (a). Zeleně označeny druhy v dospělosti zcela autotrofní. Orig. M.-A. Selosse

Naopak ve stínu vzrůstá množství uhlíku pocházejícího od hub. Výrazná plasticita mixotrofie v závislosti na světle ale nemusí platit u všech druhů (např. u evropských hruštiček, jejichž fotosyntéza možná nezávisí na míře osvětlení). Navíc se mixotrofie jen výjimečně studuje v tropech. Význam a mechanismy tohoto způsobu výživy zůstávají předmětem výzkumu, je ale zjevné, že představuje jednu z adaptací rostlin k životu ve stínu lesů mírného pásu.

Mixotrofie jako předehra

Z evolučního pohledu se zdá mykoheterotrofie odvozená z mixotrofie. Mixotrofní hruštičky jsou příbuzné mykoheterotrofním hnilákům a u více druhů orchidejí (např. z rodu vemeník – *Platanthera*, bradáček – nově řazený do rodu *Neottia*, člunátec – *Cymbidium*) fylogenetické analýzy hovoří pro dřívější vznik mixotrofie. Hlístníky a příbuzné orchideje (tribus *Neottieae*) nabízejí dobrý příklad, protože mykoheterotrofní druhy se objevily vícekrát v jinak mixotrofních rodech (obr. 9). Mykoheterotrofové tak byli nejspíš odvozeni z mixotrofů, kteří „vzdali fotosyntézu“ a začali se žít výlučně prostřednictvím mykorhizních hub. V tomto kontextu představují albíni mixotrofních orchidejí evoluční mezistupeň. Abychom poznali důležité rysy v evoluci mykoheterotrofů, zkoumali jsme důvody vzácnosti albínů v přírodě. Porovnali jsme fyziologii albínů a zelených jedinců a odhalili několik nedostatků.

Prýty albínů usychají v létě častěji než u zelených exemplářů, a to ještě před dozráním semen, zřejmě kvůli vypařování vody listy – jejich průduchy se na plném světle špatně uzavírají. Mimoto albíni častěji zůstávají několik let v dormantním stadiu – v půdě ve formě hlíz či oddenků s kořeny (ale bez prýtlů). Obě skutečnosti snižují produkci semen. Pokud dojde k jejich vytvoření, pak mnohdy v menším počtu a se sníženou klíčivostí. Tyto problémy může způsobit nedostatečná výživa. Také intenzita respirace je u albínů nižší. Navíc se v létě při vyvinutých prýtech mykorhiz-

ní houby vyskytují na kořenech vzácně nebo vůbec. Reprodukční bilance je pak neúprosná: s 1 000× méně životaschopnými semeny, než mají zelené exempláře, se mohou albíni jen těžko prosadit a zůstávají v populacích zelených jedinců vzácní.

Fotosyntetizující jedinci téhož druhu odkázali albínům znaky jako listy, průduchy nebo absenci symbiotických hub v létě, které brzdily jejich růst. Nápadná je také tvorba nadzemních prýtů i v letech, kdy jedinec nekvete – u nefotosyntetizujících albínů znamená pouze ztrátu uhlíku.

Naproti tomu úspěšný vývoj k mykoheterotrofii dal nepochybně vzniknout mnoha charakteristikám společným i nepřibuzným druhům, pro něž se stala fotosyntéza zbytečnou. Listy se postupně zmenšily, protože ztratily svou funkci. Kolonizace kořenů houbami přinášejícími uhlík se musí udržet po celý rok, nadzemní prýty se tvoří

jen tehdy, když rostlina produkuje semena. Různé odvozené vlastnosti se pak vyvinuly bezpochyby postupnými drobnými změnami – pouhá ztráta fotosyntézy nestačí. Ačkoli mixotrofové představují vstupní bránu k mykoheterotrofii, jsou v evoluci zdánlivě stálí, neboť dávají jen vzácně vzniknout mykoheterotrofním druhům a jejich albíni podléhají negativní selekci kvůli svým nevýhodným vlastnostem snižujícím životaschopnost.

Mixotrofové a mykoheterotrofové se vyvinuli díky využívání mykorhizy, symbiózy stejně staré jako samotné suchozemské rostliny. Přesto tato evoluce zůstává málo pochopena z hlediska účasti hub. Jsou parazitovány a manipulovány heterotrofní rostlinou? Anebo získávají nějaké výhody, např. vitamíny či ochranu v kořenech během nepříznivých období? Jak ovlivňují okolní zelenou vegetaci (zdroj uhlíku),

zejména, když jsou mykoheterotrofové a mixotrofové lokálně hojnější? Snižuje se jejich celková produktivita? Výzkumy ekologického dopadu těchto nedávno objevených způsobů rostlinné výživy jsou teprve na počátku.

Příspěvek je upravenou a zkrácenou verzí článku publikovaného v r. 2012 ve francouzském časopise *Dossier pour la Science* (77: 102–107), s laskavým svolením vydavatele. Přeložila Zuzana Dudová, doplnila Tamara Těšitelová.

Prof. Marc-André Selosse, prezident Botanické společnosti ve Francii, působí na Institutu systematiky, evoluce a biodiverzity (Muséum National d'Histoire naturelle) v Paříži. Mélanie Roy pracuje v Laboratoři evoluce a biologické diverzity Univerzity Paula Sabatiera v Toulouse.

Vít Latzel

Evoluční potenciál epigenetické variability

Rostliny, stejně jako všechny žijící organismy, jsou ve svém důsledku produktem genů a s nimi spřažených biochemických dějů. Sled bází tvořících DNA představuje soubor návodů, podle nichž lze z jedné buňky vytvořit celé komplexní organismy s mnoha specializovanými pletivy, tkáněmi a orgány. V průběhu evoluce je produkována řada náhodných variant, které jsou předmětem přirozeného výběru. V posledních letech se však ukazuje, že sled bází DNA není jediný systém umožňující dědičnou variabilitu, a tak se pomalu rozrůstá komunita biologů tvrdících, že evoluce nemusí zahrnovat jen selekci náhodně generovaných variant. V následujících řádcích bych proto čtenáře Živy rád seznámil s fenoménem zvaným epigenetická dědičnost.

Za zakladatele moderní genetiky můžeme s hrdostí považovat slezského rodáka německého původu Gregora Johanna Mendela, který si všiml, že při křížení variant hrachu je možné dosti přesně odhadnout procentuální zastoupení jednotlivých barevných variant v následujících generacích (viz Živa 2012, 6: 266–268 a 2014, 2: XXI–XXIII). Svá pozorování formuloval ve třech zákonech dědičnosti. Muselo ovšem uběhnout téměř 100 let, než James Watson a Francis Crick na začátku 50. let 20. stol., s využitím práce Rosalind Franklinové, objevili strukturu DNA a navrhli, jak by se mohla dědičná informace přenášet z generace na generaci pomocí sledu bází – cytozinu, guaninu, thyminu a adeninu. Tento revoluční objev umožnil rozvoj moderní biologie. Na jejich práci navázala řada vědců, kteří vzápětí rozluštili genetický kód, tedy to, jak se vytvářejí bílkoviny z genetické informace uložené v DNA, naučili se klonovat a sekvenovat DNA a v neposlední řadě zanášet cizorodé geny do DNA.

Od 50. let 20. stol. znalosti dědičnosti a evoluce znatelně pokročily, nicméně se domnívám, že v brzké době můžeme očekávat další důležité upravení našeho chápání evolučních procesů. Dědičnost a variabilita, zajištěná rozdíly ve sledu bází DNA, a existence selekčních tlaků jsou všeobecně považovány za klíčové elementy evoluce. Nové varianty genů vznikají více méně náhodnými mutacemi (změnami ve sledu bází) a sexuální rozmnožování zajišťuje jejich nekonečné kombinování.

Změny v epigenetické, tedy jakési „nadgenetické“, informaci umožňují dědičnou variabilitu bez nutnosti změny sledu bází. Zjednodušeně řečeno, epigenetická informace řídí expresi genů a tak spoluručuje, jak bude daný jedinec vypadat a interagovat s prostředím. Proto se epigenetikou nejdříve zabýval obor vývojová biologie. Uvedeme-li zjednodušeně, ačkoli všechny buňky našeho těla nesou stejnou DNA, jejich tvar i funkce se značně liší. To zajišťuje právě odlišná exprese (aktivita) genů

v různých buňkách, na níž se epigenetické změny podílejí (např. v jaterní buňce jsou aktivní jiné geny než v kožní buňce). Aktivita genů není řízena pouze vnitřními potřebami, ale také vnějším prostředím. Proměnlivost řízená prostředím se nazývá fenotypová plasticita (fenotyp – vlastnosti a vzhled organismu) a má za úkol zaručit optimální odpověď organismu na konkrétní situaci. Obecně řečeno, výsledná podoba organismu je opět důsledkem epigenetické regulace aktivity genů. Každému zajisté přijde logické, že rostliny při zastínění protahují stonky či zvětšují listovou plochu. I na tomto procesu se podílejí epigenetické mechanismy, jako např. metylace cytozinu. Pokud se enzymaticky naváží metylové skupiny na cytoziny v určité oblasti DNA, dojde k omezení či úplnému zamezení exprese následujícího genu. Tak se mohou velmi účinně a selektivně zapínat nebo vypínat jednotlivé geny v každé buňce. Čtenáře může potěšit, že k tomuto zjištění přispěla velmi významně práce českých vědců Jiřího Doskočila a Františka Šorma z 60. let 20. stol. (publikovaná r. 1962). Ekologové se dlouho domnívali, že indukovaný epigenetický stav se dědí pouze mezi somatickými buňkami (jaterní buňka dá vždy vzniknout jaterní buňce), ale nemůže se přenášet při pohlavním rozmnožování. Při meióze, klíčovém procesu sexuální reprodukce, kdy dochází k snížení počtu chromozomů, má být totiž indukovaná epigenetická informace smazána. Výzkum posledních let však ukázal, že uvedený předpoklad mnohdy neplatí. Indukované epigenetické změny se mohou přenášet i po více než 16 generacích (Latzel a kol. 2013). Velmi zjednodušeně, rodič pomocí epigenetických změn může naprogramovat svého potomka a určit mu, jaké geny má použít a které nechat stranou, což odpovídá všem evolučním poučkám. Nicméně výsledky nedávných prací (Jablunka a Raz 2009, Verhoeven a Preite 2014) jasně dokládají, že tomu tak opravdu mnohdy je.

Ve svém výzkumu se zabývám mezigenerační plasticitou rostlin, tedy předáváním fenotypu mezi generacemi. Vše začalo náhodou, když jsme s kolegy z Botanického ústavu AV ČR, v. v. i., zjistili, že se rostliny lépe vypořádávají s nepříznivými