

Fotosyntetizující živočišné buňky – mohou chloroplasty fungovat v savčích buňkách?

Je tomu přibližně 5 000 let, co bylo vynalezeno kolo. Lidstvo získalo účinný prostředek dopravy a lepší přístup k potravě. Avšak pohled na rostliny kolem nás odhaluje jednu zřejmou pravdu: mobilita není vždy nezbytná pro přežití. Rostliny zakoreňují a daří se jim i bez pohybu z místa na místo. Tuto pozoruhodnou schopnost jim dává fotosyntéza, nejvyspělejší samoudržitelný systém. Fotosyntéza je chemická reakce, která využívá světelnou energii k výrobě organických sloučenin a kyslíku z oxidu uhličitého a vody. Zatímco živočichové získávají energii konzumací jiných organismů, rostliny mohou přežít pouhým pohlcováním slunečního světla. Co kdyby však zvířata byla schopna fotosyntézy? Mohli by i lidé žít bez jídla a živit se výhradně ze slunečního světla?

Někteří živočichové v přírodě již nepřímo vykonávají fotosyntézu s využitím chloroplastů. Bylo např. zjištěno, že některé druhy mořských plžů začleňují chloroplasty řas do svých těl, což jim umožňuje přežít díky fotosyntéze i během období hladovění (Pelletreau a kol. 2011, Aoki a Matsunaga 2021; viz také str. 180 této Živy). Kvůli nízké účinnosti by bylo obtížné fotosyntézu využít k přežívání velkých organismů, jako je člověk, využití fotosyntézy na buněčné úrovni by však mohlo být stále možné. Pokud by pluripotentní kmenové buňky (schopné se diferencovat do různých typů specializovaných buněk) – k nimž patří i indukované pluripotentní (iPS) buňky a embryonální kmenové (ES) buňky – získaly fotosyntetické schopnosti, mohly by fungovat jako biologické továrny a produ-

kovat užitečné látky, mimo jiné organické sloučeniny a kyslík (kmenové buňky disponují neomezeným potenciálem proliferace, tedy možností kontinuální kultivace pro účely získání zdroje živočišných bílkovin s využitím světla jako zdroje energie). Tento přístup slibuje uplatnění v oblastech, jako jsou medicína a tkáňové inženýrství. Ve skutečnosti se již vyvíjí „fotosyntetická terapie“, např. injekční aplikace řas přímo do srdcí myši postižených nedokrvností za účelem zmírnění hypoxického stavu (Cohen a kol. 2017).

Jako krok směrem k vytvoření „fotosyntetických živočišných buněk“ jsme vnesli chloroplasty přímo do kultivovaných savčích buněk, analyzovali jejich morfologii a funkci a zkoumali proveditelnost fotosyntézy (Aoki a kol. 2024).



Izolace chloroplastů z řas

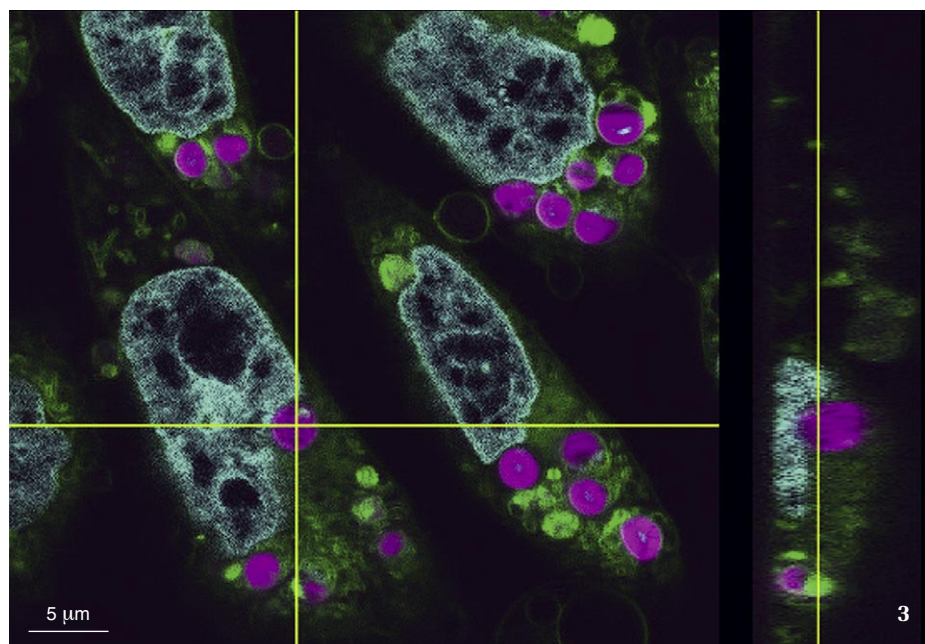
Nejprve jsme se zaměřili na izolaci a čištění chloroplastů. Jako dárce chloroplastů jsme vybrali jednobuněčnou primitivní červenou řasu *Cyanidioschyzon merolae*. Tato mikrořasa, o průměru přibližně 2 μm, obývá horká a silně kyselá prostředí (45 °C, pH 1,5), např. geotermální oblasti (Matsuzaki a kol. 2004). Hlavním důvodem jejího výběru je relativně nízká závislost funkce chloroplastů na jaderném genomu ve srovnání s ostatními rostlinami.

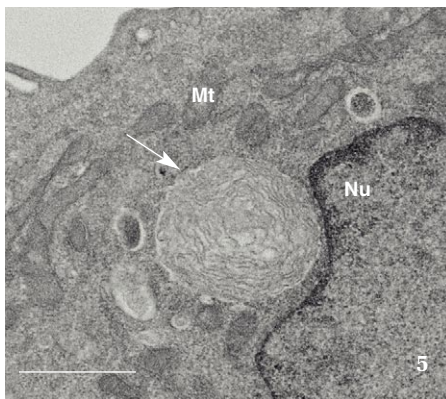
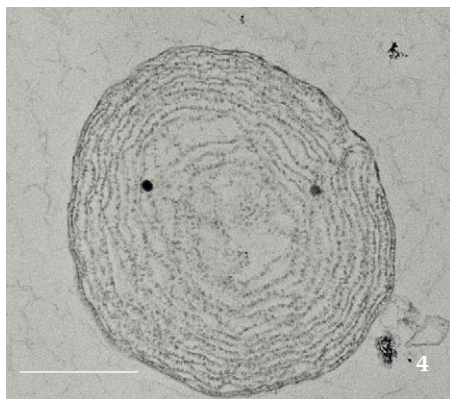
Původ chloroplastů sahá přibližně 1,6 miliardy let do minulosti, kdy rané eukaryotické buňky pohltily volně žijící fotosyntetické bakterie, což vedlo k vytvoření endosymbiotického vztahu mezi nimi. Během tohoto procesu se některé původní geny bakterie přenesly do jaderného genomu hostitelské buňky a fotosyntetické bakterie se vyvinuly do buněčných organel – chloroplastů. Zatímco chloroplasty většiny rostlinných druhů jsou vzhledem k přestěhování řady svých původních genů do jádra buňky závislé na genomu hostitele, *C. merolae* vykazuje relativně vysokou autonomii chloroplastů díky postavení evolučně rané řasy. To naznačuje, že si mohou zachovat základní funkce i za proměnlivých podmínek prostředí.

Proces izolace a čištění chloroplastů je poměrně jednoduchý. Chloroplasty jsme úspěšně izolovali narušením buněk *C. merolae* a oddělením uvolněných buněčných struktur pomocí odstředění v hustotním gradientu. Naše pozorování potvrdila, že izolované chloroplasty si udržely stabilní kulatý tvar a zachovaly si fotosyntetickou aktivitu (obr. 1 a 2). Na základě těchto zjištění jsme dospěli k závěru, že jsou vhodné pro další experimenty.

Chloroplasty v savčích buňkách

Abychom vnesli chloroplasty do savčích buněk, konkrétně buněčné linie CHO-K1, odvozené z buněk vaječníků křečička čínské (Cricetulus griseus) a běžné v biologickém, lékařském i biotechnologickém výzkumu, využili jsme buněčnou fagocytózu – běžný mechanismus, kterým jsou pohlčovány a tráveny látky nacházející se v okolí fagocytující buňky. Dobře známým





1 a 2 Řasa *Cyanidioschyzon merolae* (obr. 1), z níž byly izolovány chloroplasty (2).

3 Snímek ze superrozlišovací fluorescenční mikroskopie buněk CHO-K1, savčí linie odvozené z vaječníků křečička čínského (*Cricetulus griseus*), které pohltily chloroplasty, po společné kultivaci, den 0. Buněčné membrány barveny pomocí FM1-43 (zeleně), jádra barvená DAPI (modře). Chloroplasty vizualizovány autofluorescencí (fialově)

4 až 7 Ultrastrukturální analýzy izolovaných a začleněných chloroplastů v savčích buňkách v elektronovém mikroskopu. Stejná oblast, která byla zkoumána fluorescenční mikroskopií. Začleněný chloroplast (obr. 4), chloroplasty v buňkách CHO-K1 ihned po společné kultivaci (den 0; 5) a dva dny po společné kultivaci (6), měřítko 2 μ m. Degenerované chloroplasty v buňkách CHO-K1 čtvrtý den po společné kultivaci (7), měřítko 3 μ m. Bílé šipky ukazují chloroplasty, Nu – jádro, Mt – mitochondrie. Všechny snímky a orig. autoři článku

příkladem tohoto procesu jsou některé imunitní reakce, kdy bílé krvinky pohlcují a rozkládají patogeny v lidském těle.

Pro usnadnění přijetí chloroplastů jsme je souběžně kultivovali se savčí buněčnou linií CHO-K1. Po společné kultivaci jsme pomocí superrozlišovací světelné mikroskopie odhalili, že přibližně 20 % buněk CHO-K1 obsahovalo mezi jedním a pěti chloroplasty. Jak je znázorněno na obr. 3, byly chloroplasty hustě uspořádány v cytoplazmě savčí buňky, čímž vytvářely výrazný vizuální efekt.

Analýza struktury chloroplastů s vysokým rozlišením

Fotosyntéza obvykle probíhá využitím potenciálového rozdílu mezi tylakoidními membránami a lumenem (vnitřkem tylakoidu). Abychom mohli ultrastrukturu chloroplastů pozorovat podrobněji, provedli jsme analýzu elektronovou mikroskopií (obr. 4–7). Odhalila několik vrstev tylakoidních membrán uvnitř izolovaných chloroplastů, což naznačuje, že si uchovávají své vrstevnaté uspořádání i po izolaci z buňky.

Následně jsme zkoumali strukturu chloroplastů v savčích buňkách ve třech časových bodech: ihned po společné kultivaci (den 0), druhý a čtvrtý den. Zatímco vrstevná struktura zůstala nedotčena do dne 0, již druhý den se objevily částečné deformace a první známky jejího zhroutění. Čtvrtý den se vrstvy chloroplastů zcela rozpadly

a nebyla zachována žádná rozpoznatelná struktura (obr. 7). Tato zjištění napovídají, že chloroplasty mohou ve vnitrobuněčném prostředí savčích buněk udržet strukturu alespoň dva dny. Vzhledem k tomu, že náš experimentální přístup spoléhá na fagocytózu pro zavedení chloroplastů do buňky, je pravděpodobné, že jejich degradace je do značné míry způsobena buněčnými trávicími mechanismy.

Klíčovou otázkou zůstává, zda si začleněné chloroplasty zachovávají schopnost fotosyntézy. K ověření jsme zhodnotili účinnost elektronového transportního řetězce (Φ II) u chloroplastů lokalizovaných v savčích buňkách. Elektronový transportní řetězec představuje tok elektronů a související chemické reakce, které jsou spušteny pohlacením světla chloroplasty – jde o klíčový proces v počátečních fázích fotosyntézy. Do druhého dne nebyl zjištěn významný rozdíl v účinnosti elektronového transportu ve srovnání s chloroplasty před jejich zavedením. Ke čtvrtému dni však účinnost výrazně klesla. Tento pokles odpovídá strukturnímu kolapsu, který jsme pozorovali pomocí elektronové mikroskopie, což naznačuje, že ztráta tylakoidní struktury přímo ovlivňuje funkci fotosyntézy.

Uvedená zjištění poskytují klíčové důkazy o proveditelnosti dočasné fotosyntézy v savčích buňkách, zároveň však upozorňují na problém udržení integrity chloroplastů pro dlouhodobou fotosyntetickou aktivitu. Souhrnně tedy naše studie dokazuje, že chloroplasty si mohou minimálně po dobu dvou dnů udržet jak svou strukturní organizaci, tak funkci elektronového transportu uvnitř savčích buněk.

Závěrem

Výsledky potvrzují, že chloroplasty začleněné do savčích buněk si zachovávají aktivitu elektronového transportního řetězce – počáteční fáze fotosyntézy. Je však třeba

provést další studie, aby se ověřilo, zda tyto chloroplasty vytvářejí fotosyntetické produkty, jako jsou glukóza a kyslík.

Koncept „fotosyntetických živočišných buněk“, dříve považovaný za čistě spekulativní, se nyní začíná jevit jako životaschopná výzkumná cesta. Věříme, že naše zjištění poskytují klíčový základ pro další rozvoj tohoto oboru a posouvají nás o krok blíže k realizaci inovativního konceptu.

Přeložil Jiří Fajkus.

Poznámka překladatele

Chloroplasty jsou orgány rostlinných buněk, ve kterých probíhá fotosyntéza – proces, při němž rostliny za pomoci slunečního světla vyrábějí z oxidu uhličitého a vody kyslík a cukry. Díky tomu slouží jako „solární elektrárny“ rostlin. Japonští vědci úspěšně vnesli izolované chloroplasty z řasy *Cyanidioschyzon merolae* do linie buněk křečička čínského CHO-K1. Chloroplasty si po určitou dobu udržely fotosyntetickou aktivitu a byly v buňkách pozorovatelné až několik dní po společné kultivaci. Tato schopnost otevírá potenciální možnosti praktického využití. Jednou z nich je použití fotosyntetizujících živočišných buněk jako alternativního zdroje energie či výživy. Produkovaná glukóza a kyslík by mohly i podpořit přežití buněk v nedostatečně prokrvených tkáních, např. po infarktu nebo při poraněních, kde by přímá fotosyntetická aktivita mohla zlepšit metabolické podmínky. Dále lze uvažovat o pěstování takových buněk jako potravin, zejména v prostředích s omezeným přístupem k tradičním zdrojům živočišných bílkovin, např. ve vesmíru nebo v extrémních podmínkách. Zavedení chloroplastů do kmenových buněk by mohlo umožnit tvorbu tkání do určité míry energeticky autonomních, což by mohlo být výhodné pro vývoj transplantátů nebo bioléčbu.

Zároveň však existují rizika. Cizorodé chloroplasty mohou v těle vyvolat imunitní reakci, což je zásadní problém pro klinické využití. Otevírají se i etické otázky ohledně vytváření hybridních forem života, které kombinují vlastnosti rostlin a živočichů. Nelze opomenout ani ekologická rizika, mimo jiné možnost nechtěného úniku fotosyntetizujících živočišných buněk do přírody a jejich potenciální vliv na ekosystémy. Přestože jde o raný výzkum, představuje fascinující příklad mezidruhového přenosu organel s širokým aplikačním potenciálem.

Použitá literatura a doplňující fotografie uvedeny na webové stránce Živý. K dalšímu čtení např. Živa 2016, 4 a 2017, 3 a 4.