

PŘIROZENÁ ATENUACE POHLEDEM ENVIRONMENTÁLNÍ MIKROBIOLOGIE

Jiří Mikeš

EPS, s.r.o., V Pastouškách 205, 686 04 Kunovice, eps@epssro.cz

Jedním ze tří důkazů, jejichž splněním lze potvrdit, či vyvrátit přítomnost procesů přirozené atenuace na lokalitě, je osídlení sledovaného prostředí mikroflórou, která za daných podmínek dokáže uskutečňovat své metabolické a fyziologické projevy. Vědecká disciplína studující mikroorganismy se nazývá mikrobiologie. Tento obor dosáhl značné mohutnosti a přirozeně se v souvislosti s rozšiřujícím objemem poznání rozčleňuje na dílčí obory, jejichž společným jmenovatelem je konkrétní orientace na oblasti prostředí, z něhož studované mikroorganismy pocházejí (např. půdní mikrobiologie, geomikrobiologie, lékařská mikrobiologie), popřípadě reflektuje metodologickou oblast používanou ke studijním účelům (molekulární mikrobiologie, technická mikrobiologie, buněčná mikrobiologie, mikrobiální genetika) a v neposlední řadě existují konkrétní odvětví spojené s technologickým uchopením biologického činitele (potravinářská mikrobiologie, biotechnologie na bázi mikrobiálních procesů – výroba léčiv, produkce chemických látek, obecně tedy průmyslová mikrobiologie).

Z hlediska studia a zužitkování procesů přirozené atenuace je klíčová oblast environmentální mikrobiologie. Tento obor shromažďuje a vyhodnocuje poznatky získané studiem role mikroorganismů v přirozeném prostředí. Dominantní je sledování mikrobiálních jedinců v kontextu jejich podílu na koloběhu hmoty v přírodě, zejména v rovině dekompozice organické hmoty do její anorganické podoby, a pak také jejich úloha v rámci tzv. biogeochemických cyklů. Druhým nesmírně důležitým okruhem mikrobiologie v kontextu prostředí je bezesporu mikrobiální ekologie. Tato disciplína řeší vztahy mezi organismy vzájemně a vztahy v rovině mikroorganismus versus prostředí. Oba zdůrazněné obory slouží jako soubory informací pro vysvětlení, pochopení a zužitkování přirozené atenuace jako mechanismu, jímž vlastní prostředí může reagovat na přítomnost antropogenního polutantu v prostředí. Na tomto místě je účelné zmínit rozdíl v terminologii znečištění životního prostředí. Například ropa je integrální součástí přírody v podobě svých ložisek. V důsledku těžby a manipulace s touto surovinou však došlo a dochází k její alokaci v těch částech prostředí, kde je její výskyt nepřirozený. Oceány znečištěné v důsledku havárií tankerů tak musí čelit přítomnosti velkých koncentrací látek, které se zde přirozeně nevyskytují. V tomto vnímání ropa představuje environmentální kontaminant. Lidskou činností (ne vždy zodpovědnou) se však do prostředí dostávají i látky, jež se v přírodě nevyskytují (např. chlorované uhlovodíky, pesticidy, endokrinní disruptory) – tyto látky se nazývají xenobiotika - a fakt, že řada mikroorganismů je schopna tyto sloučeniny transformovat do podoby méně toxické, se musí přisuzovat flexibilitě mikroorganismů podmínkám prostředí se přizpůsobit. Ať už difuzním, nebo bodovým způsobem distribuovaná kontaminace v prostředí je selekčním tlakem, který utváří poměry v daném prostředí a vymezuje podmínky, vůči kterým se mikrobiální populace mohou adaptovat a zužítkovat konkurenční výhodu. Právě tímto způsobem se u mikroorganismů zformovala oblast schopností, které lze využít v biologické nápravě škod na životním prostředí.

MIKROORGANISMY

Nejjednoduššími formami organismů přítomných na Zemi jsou mikroorganismy. Z hlediska stavby jejich těla je třeba zdůraznit, že se jedná o organismy jednobuněčné (vyjma plísní, jejichž struktura je tvořena více buňkami a jedná se o jednoduchou formu hub). Struktura buňky rozhoduje o jejich klasifikaci. Současná taxonomie vychází z konceptu, že mikroorganismy lze členit do tří velkých skupin. Vývojově (pravděpodobně) nejstarší jsou tzv. *Archea*, jedna z domén v rámci vývoje organismů na Zemi. Jsou nezávislé na dalších doménách (bakterie a eukaryotní organismy) a odlišují se od nich stavbou cytoplazmatické membrány, buněčné stěny, genomu a dispozicí některými

unikátními metabolickými nástroji. Ač všudypřítomné, specifickou oblastí jejich výskytu jsou prostředí s extrémními podmínkami (vysoké teploty, extrémní hodnoty pH, vysoká salinita). Svou flexibilitou a přizpůsobivostí si vyvinuly mechanismy, jak zužitkovávat velmi jednoduché sloučeniny a čelit podmínkám, jež jsou pro jiné organismy nepříznivé. Sehrávají klíčovou roli v koloběhu prvků na Zemi a disponují unikátními typy enzymů. Nejčastěji bývají spojovány s anaerobní digestí (s procesy tvorby bioplynu) a jedinečná je jejich schopnost transformovat a akumulovat kovy. Druhou významnou skupinou organismů jsou bakterie (*Bacteria*). Jejich stavba buňky se označuje jako prokaryontní, od jiných buněčných organismů se odlišují neohrazeným jádrem a specifickou konstrukcí buněčné stěny. Představují nejrozšířenější formu organismů na Zemi (v 1 gramu půdy se vyskytuje 40 milionů buněk, v 1 ml vody asi 1 milion buněk bakterií). Pro jejich charakterizaci je klíčový vztah k teplotě, pH a kyslíku. Podle preferovaných podmínek určených uvedenými faktory se bakterie technicky rozdělují na další skupiny. Z hlediska přirozené atenuace je podstatné všimnout si tzv. psychrofilních bakterií (žijících v podmínkách chladu) a bakterií s aerobním a anaerobním metabolismem. Konečně třetí skupinou mikroorganismů jsou eukaryota – například kvasinky a plísně. Evoluční teorie se přiklání k názoru, že vznikly procesem endosymbiózy, tedy vyšší organizací bakterií a *Archea* v nové organismy. Bakterie se v podmínkách nové integrace vyprofilovaly v organely (buněčné součásti), které jsou dnes u těchto organismů zodpovědné za respiraci (mitochondrie), nebo fotosyntézu (chloroplasty). S ohledem na obrovský objem informací, které dnes tvoří mikrobiologii, je obtížné na omezeném prostoru stručně vystihnout principy tohoto oboru. Vzhledem k přirozené atenuaci musí být věnována pozornost jejich metabolismu (látková přeměna), způsobům výskytu v prostředí a jejich migraci a v neposlední řadě mechanismům, jež mikroorganismům umožňují přizpůsobovat se novým podmínkám (adaptace).

Mikroorganismům, o které se přirozená atenuace opírá, se odborně říká autochtonní mikroflóra (někdy se uplatňuje termín indogenní), česky původní mikrobiální osídlení. Opozitem vůči těmto termínům je výraz alochtonní, jímž se označují mikroorganismy z prostředí izolované a přechovávané v umělých systémech. Často se používají v inženýrsky orientovaných bioremediačních zákrocích, proces jejich vnesení do prostředí se charakterizuje jako bioaugmentace. Nicméně se sluší zdůraznit, že každý alochtonní mikroorganismus byl původně mikroorganismem autochtonním. Přirozená atenuace se zejména v anglosaské literatuře nahrazuje termínem *intrinsic attenuation*. *Intrinsic* je anglické adjektivum s významem vnitřní, (vnitřně) vlastní, v případě přirozené atenuace tedy zejména prostředí, které se v rámci obnovení přirozených rovnováh opírá o schopnost svých organismů napomoci procesu dekontaminace vlastními silami. Pasivní biodegradace je označením pro procesy, k nimž dojde samovolně v důsledku součinnosti možností, kterými prostředí disponuje.

MIKROBIÁLNÍ METABOLISMUS

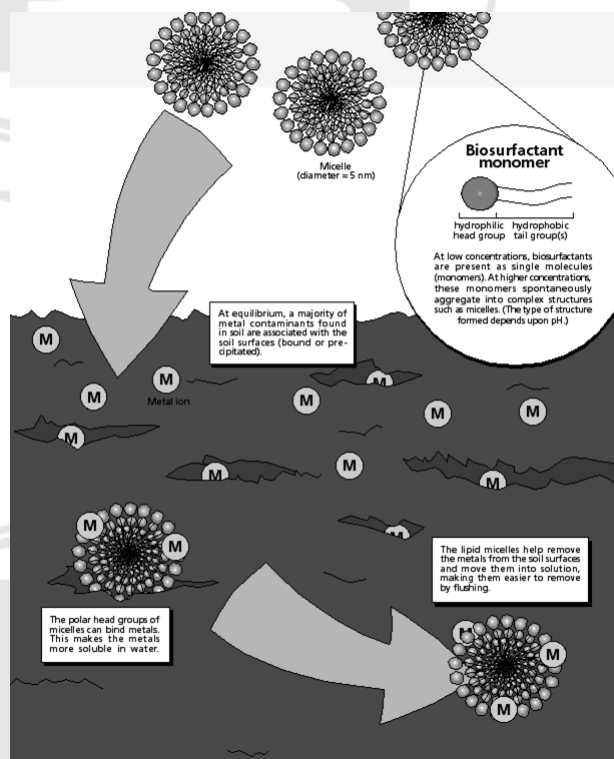
Metabolismus nejlépe vystihuje definice, která říká, že se jedná o soubor rozkladných a skladebných procesů, při nichž se přeměňuje hmota, energie a informace. Obecně jakýkoli organismus potřebuje stavební komponenty pro růst a obnovu svého těla, dále potřebuje energii, díky které může vykonávat svoje fyziologické potřeby (pohyb, zachycení k povrchu) a v neposlední řadě je pro něj nezbytné udržovat rovnováhu ve svém vnitrobuněčném prostředí a prostředí mimobuněčném. Nástroji, kterými lze rozkládat organickou hmotu, jsou enzymy, látky na bázi proteinů, které katalyzují celé spektrum přeměn (nejčastěji redoxní děje, hydrolýzu a přesuny funkčních skupin sloučenin). Rozkladem složitějších sloučenin se získávají stavební komponenty, které se následně uspořádávají do látek nových, z nichž je buňka vystavěna. Život organismů je nepřestávající soubor dějů rozkladu a výstavby. Z pohledu znečištěného životního prostředí je základním principem substituce přirozeně využívaných látek látkami označovanými jako polutanty. Kontaminanty životního prostředí se tak stávají mikrobiálním substrátem. Z definice substrátu v rámci mikrobiologie vyplývá, že substrátem je každá taková látka, která může sloužit jako zdroj uhlíku, dusíku, fosforu a dalších prvků a energie. Získávání energie je v biologickém úhlu pohledu potřeba chápat jako tok elektronů. Látka bohatá na elektrony (nacházející se v redukovaném stavu) je procesem zvaným oxidace přeměňována do

podoby s nižším počtem volných elektronů, a získané elektrony naopak potřebují oxidovanou formu sloučeniny, kterou redukují. Je třeba velmi důrazně podotknout, že není redukce bez oxidace a naopak. V mikrobiologické terminologii se ustavil pojem zdroj elektronů (donor; redukováná látka, např. ropné uhlovodíky, laktát) a pojem akceptor elektronů (příjemce; např. dusičnany, Fe(III), Mn(IV), sírany a oxid uhličitý). Nejtypičtějším příjemcem elektronů je ale kyslík, plní-li funkci akceptoru elektronů, označuje se takový metabolismus za aerobní. Ostatní výše uvedené akceptory plní svou analogickou úlohu v tzv. anaerobních respiracích. Specifickým typem metabolismu je fermentace. V těchto dějích plní funkci organická látka (endogenní akceptor elektronů), která je přeměňována v látku jinou, typickým příkladem je pár glukosa – ethanol), nicméně v přírodě jsou fermentovány např. sacharidy nebo mastné kyseliny a tento děj rezultuje v tvorbu vodíku a organických kyselin, alkoholů apod. V přirozených podmínkách představuje fermentace důležitý proces tvorby vodíku, jež vyžadují producenti methanu (bioplyn) a sulfát redukující bakterie (SRB). Zajímavostí budiž fakt, že k fermentaci může docházet i za přítomnosti kyslíku, pokud je koncentrace organické látky natolik vysoká, že nastane represe aerobního metabolismu. Tyto děje jsou typické pro organismy schopné přepínat aerobní a anaerobní režim respirace (např. kvasinky). Pro vytvoření komplexního pohledu na mikrobiální metabolismus je důležité zmínit existenci jevu označovaného jako kometabolismus. Tyto děje nejsou spojeny látkově ani energeticky s centrálním metabolismem, uskutečňují se v důsledku nadbytečné produkce nesespecifických enzymů, které transformují i jiné látky. Z pohledu biotechnologií technické ochrany životního prostředí je dobrým příkladem mikroorganismus využívající methan, kde vzniklé oxidasy (oxidaci katalyzující enzymy) mohou transformovat některé chlorované uhlovodíky. Pro pochopení procesů přirozené atenuace je nezbytné správně chápat funkci mikrobiálního metabolismu, odlišovat aerobní a anaerobní respiraci, fermentaci, orientovat se v termínech donor a akceptor elektronů a vnímat obecně vztah mikroorganismu k polutantu nikoli jako jeho dobrou vůli přispět k nápravě škod na životním prostředí, nýbrž jako snahu zajistit si nezbytné potřeby a faktory, jež mu umožní přežít, reprodukovat se a zachovat svoji populaci. Vzhledem ke skutečnosti, že biodegradace je hnací silou přirozené atenuace, vyžaduje tato pasáž největší pozornost.

PODPŮRNÉ MECHANISMY A STRATEGIE

Schopnost mikroorganismů existovat v prostředí (tedy i kontaminovaném) se neopírá výlučně o metabolické schopnosti. Dalšími důležitými vlastnostmi je účinná schopnost regulace těchto mechanismů, ale především tvorba podpůrných látek a volba strategií, jak v takovýchto typech prostředí přežít. Jednou z velmi frekventovaných cest je schopnost adorované formy růstu, jinými slovy schopnost vytvářet biofilmy. Biofilm lze vnímat jako mnohobuněčný organismus tvořený z různých druhů jednobuněčných organismů, jež vůči sobě neuplatňují antagonismus, ale na bázi neutralismu a synergie jsou schopné fungovat v integritě vícebuněčné vrstvy, v prostředí obklopeném extracelulárně produkovanou hmotou a zejména s dokonale organizovanou funkční strukturou. V rámci biofilmu se profilují jednotlivé mikrobiální úlohy, buňky nejbližší abiotickému povrchu se specializují jako vazebné elementy, které zprostředkovávají vazbu k povrchu i vzájemnou. Naopak buňky na povrchu biofilmu se věnují chemické signalizaci a komunikaci. Strategie biofilmu sehrává svoji úlohu v rámci efektivnější strategie zužitkovat substrát, jenž v přirozených podmínkách nemusí být vždy dostupný v dostatečném množství. Svou fixací zvyšují pravděpodobnost zachycení migrujícího substrátu výrazně více než v systému submersním, tedy v rovině volného výskytu. V rámci přirozeného prostředí významně dominuje forma růstu v biofilmech, na rozdíl od volné formy výskytu, zejména z výše uvedeného důvodu. Strategie biofilmu má mnoho dalších významů, jedním z důležitých je rovněž ochrana takto vázaných populací před letálním a inhibičním účinkem řady látek (antibiotika, ale také vyšší koncentrace polutantů, jež však mohou na biologické bázi být přeměňovány). Mechanismy jsou většinou postaveny na principu obětování vrchních vrstev, které chrání vrstvy spodní. Biofilm má nesporné technologické uplatnění, které se využívá jak při konstrukci bioreaktorů, tak třeba v rámci procesů spojených s nakládáním s odpadními vodami. Součástí biofilmu bývají tzv. extracelulární sloučeniny, jež disponují bezpočtem vazebných míst, a jednou

z frekventovaných biologických metod snížení rizik toxických kovů je biologická imobilizace do těchto struktur (biosorpce). Někdy se o EPS hovoří jako o aditivních obalových strukturách. Biofilmy nemusí vznikat výhradně na abiotických površích, jež jsou součástí horninového prostředí, ale vytvářejí se i na fázových rozhraních. Tímto způsobem bývají biodegradovány ty látky, které inklinují k tvorbě fázových rozhraní (ropné látky).



Obr. 1 Uplatnitelnost biologických povrchově aktivních látek produkovaných mikroorganismy

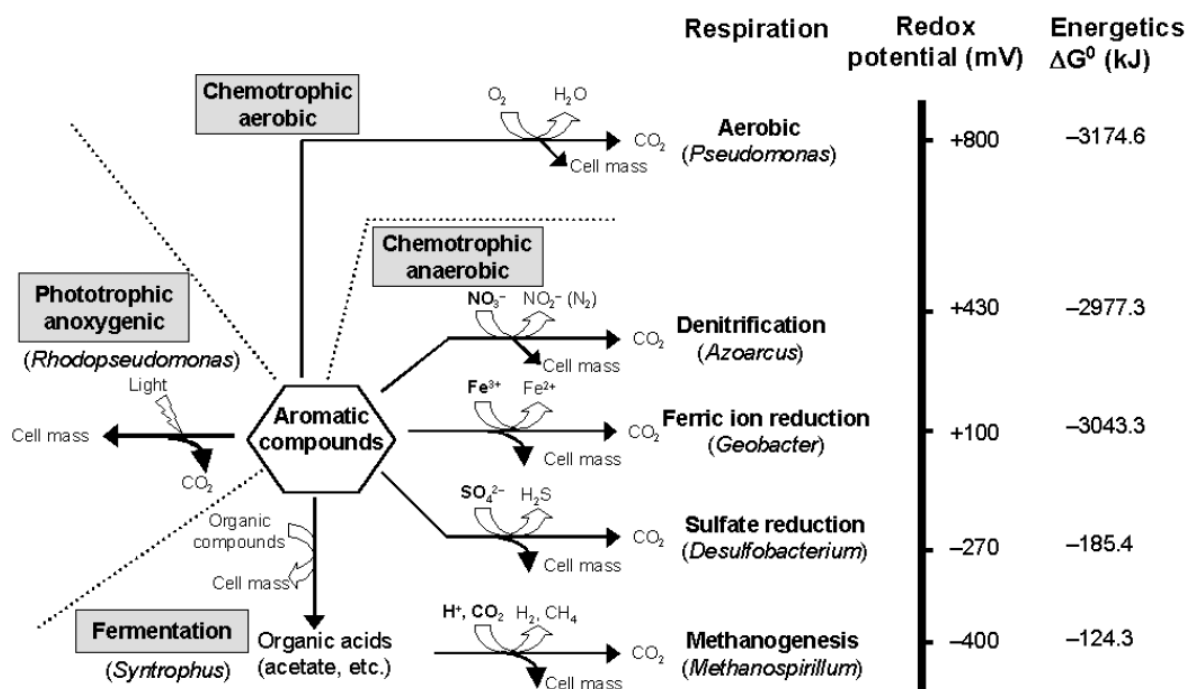
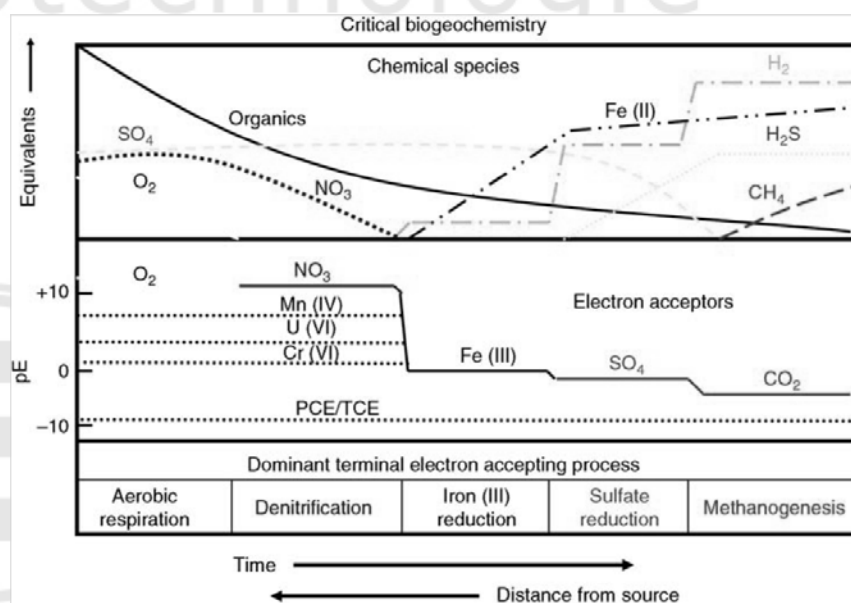
Nezbytnou podmínkou biologického rozkladu ropných látek je dispozice tvořit biologické povrchově aktivní látky, díky kterým se nepolární polutant mění do podoby více polární a zvyšuje se tedy jeho mobilita, resp. rozpustnost ve vodném prostředí. Další předpokladem pro existenci v podmínkách, kde dostupný substrát představuje nepolární látka, je hydrofobní povrch obalových struktur, který často bývá spojován s tvorbou pigmentů (obr. 1).

BIODEGRADAČNÍ MIKROORGANISMY

Jak již bylo zmíněno, proces, díky němuž může přirozená atenuace participovat na transformaci škodlivých látek v prostředí do podoby méně škodlivých, je biodegradace, tedy částečný nebo (v ideálním případě) úplný rozklad antropogenních polutantů. Mikroorganismy, které jsou schopné tyto děje zaštiťovat, musí být vybaveny nástroji, jež jim umožní kontaminantem nahradit své obvyklé zdroje substrátů. V celé řadě případů (např. ropné látky) se tak děje na základě analogie ve struktuře k látkám přirozeně se vyskytujícím (např. tuky). Má-li být polutant biologicky transformován zcela, je nutné, aby byly spojeny ve velké většině případů všechny aspekty mikrobiálního metabolismu. Jinak řečeno, je třeba, aby byl kontaminant využit jako zdroj uhlíku, stavebních prvků a energie a aby se uplatnil i kometabolismus (např. u chlorovaných uhlovodíků). Nesmí být zapomenuto ani na další klíčovou podmínku, na dostupnost terminálního akceptoru elektronů. Právě podle charakteru látky plnící tuto funkci se rozdělují skupiny biodegradačních mikroorganismů uplatňujících se v procesech přirozené atenuace. Tímto výrokem se připomíná další ze tří klíčových důkazů udržitelnosti atenuačních mechanismů v prostředí – důkaz úbytků potenciálních akceptorů elektronů. V ohnisku kontaminačního mraku se nejrychleji vyčerpají akceptory elektronů a navozený anoxický stav vytváří příznivé podmínky pro uplatnění methanogeneze, procesu striktně anaerobních, v nichž figuruje jako akceptor elektronů oxid uhličitý. Nicméně zákonitě se vkrádá otázka, odkud se v tomto systému oxid

uhličitý bere? Odpověď je fermentace – právě přítomnost mikroorganismů, které za anaerobních podmínek využívají jako svůj akceptor elektronů organickou látku (např. benzen, ropný uhlovodík) a přeměňují ho ve vodík, oxid uhličitý a organické kyseliny, je klíčová pro uplatnění methanogenních populací, které svými enzymovými nástroji redukují oxid uhličitý (plní jim funkci akceptoru elektronů, jejichž zdrojem je vodík) na methan. Tyto děje probíhají v systémech, kde hodnota redoxního potenciálu klesá až k – 400 mV (vliv redox potenciálu graficky vystihuje obr. 2 i obr. 3). Uvolněný methan může být důkazem methanogeneze, nicméně v přirozených podmínkách s přístupem kyslíku se stává substrátem methanotrofních bakterií, jež ho oxidují na oxid uhličitý. Právě methanotrofní bakterie však představují učebnicový příklad mikroorganismů, které umožňují průběh kometabolických transformací některých polutantů ve vrstvách s přístupem kyslíku. V pořadí rychlosti spotřeby terminálních akceptorů však oxid uhličitý figuruje až na posledním místě.

Obr. 2 Dominující procesy podle terminálního akceptoru elektronů



Obr. 1 Biodegradační mikrobiální metabolismus – schematicky

V anaerobních podmínkách za přítomnosti síranů se výskytem tzv. sulfát redukujících bakterií může uskutečňovat sulfátová respirace. To je situace, kdy terminálním akceptorem elektronů je sloučenina síry v nejvyšším možném oxidačním stupni, tedy síran, a zdrojem elektronů (substrátem, zdrojem uhlíku a energie) může mimo jiné být právě organická sloučenina v podobě síranu. K těmto dějům dochází při hodnotách redoxního potenciálu kolem -270 mV. Tyto bakterie svým metabolismem dotují prostředí sulfidy, které za vhodných abiotických podmínek (pH) slouží jako srážedlo pro řadu toxických kovů a snižují jejich mobilitu v prostředí, čímž přispívají k omezení rizik vyplývajících z jejich možného šíření ekosystémem. Důkazem probíhající redukce sulfátů biologickou cestou je tvorba sulfanu s charakteristickým zápachem, popř. barevně dobře identifikovatelných sraženin v podobě sulfidů příslušných kovových kationtů. V prostředí kolem $+100$ mV se vyskytují bakterie, které jsou schopné jako svůj zdroj akceptorů elektronů využít oxidovanou formu železa (Fe^{3+}), popř. manganu (Mn^{4+}). Nejznámějšími zástupci v těchto skupinách tzv. železo (mangan) redukujících bakterií jsou rody *Geobacter* a *Shewanella*. Tyto bakterie významným způsobem přispívají k uskutečňování biogeochemických cyklů a jejich zásluhou se transformuje anorganická hmota. Vedle této skutečnosti se v drtivé většině případů jedná o oligotrofní populace, tzn. mikroorganismy velmi skromné v nárocích na nutriční faktory. Stále se prokazuje, že vedle zmíněných vlastností disponují i enormním biodegradačním potenciálem a jako jejich zdroj uhlíku a energie se může uplatnit široká škála antropogenních polutantů. Produktem tohoto typu metabolismu je dvojmocné železo a mangan, tedy kationy těchto kovů rozpustné ve vodném prostředí. S rostoucím oxidativním charakterem prostředí nalézají uplatnění denitrifikační bakterie. Jejich akceptorem elektronů je dusičnan a redukčním ekvivalentem (tedy zdrojem elektronů, energie) jak redukované organické sloučeniny (mimo jiné polutanty), tak také např. sulfidy. V tomto případě se hovoří o tzv. lithotrofních denitrifikantech a tato skupina bakterií velmi cenná svým metabolickým působením v rámci koloběhu prvků v prostředí. Dusičnan se transformuje do podoby dusíku nebo amonných iontů. Redox potenciál denitrifikačního metabolismu nabývá hodnot kolem $+430$ mV. Energeticky nejsnazším akceptorem elektronů je kyslík, jenž figuruje jako elektronový akceptor při redox potenciálu až $+800$ mV. Z těchto důvodů (jak již bylo uvedeno výše) bývá v prostředích bez trvalé dotace nejrychleji vyčerpán a přirozeně se navozují podmínky anoxické, resp. anaerobní, v nichž jsou schopné existovat mikroorganismy, které mají schopnost tzv. anaerobní respirace. Na obrázku 1 je schematickým způsobem znázorněna heterogenita metabolických dějů jednotlivých skupin mikroorganismů přítomných v prostředí.

V mikrobiologii se velmi dobře ujalo členění mikroorganismů do skupin podle jejich metabolických projevů, které je do značné míry univerzální. Zjednodušeně se jedná o hledání odpovědí na tři okruhy otázek:

- Co je zdrojem uhlíku a dalších prvků pro výstavbu mikrobiální buňky?
Je-li zdrojem uhlíku oxid uhličitý, hovoří se o tzv. autotrofních mikroorganismech. Jako příklad mohou posloužit sulfát oxidující bakterie, které zabudovávají uhlík z oxidu uhličitého. Představuje-li zdroj uhlíku organická sloučenina, označuje se tento typ metabolismu jako heterotrofní. V přírodě demonstruje flexibilitu mikrobiálního metabolismu z hlediska zdroje uhlíku třetí skupina, tzv. mixotrofní, která se vyznačuje kombinováním obou výše uvedených přístupů. Specifickým příkladem heterotrofie je fermentace, kdy je využit pouze určitý podíl z dostupné organické látky a ta se transformuje do podoby fermentačních produktů (např. sacharidy na alkoholy a organické kyseliny).
- Co představuje zdroj elektronů (redukční ekvivalent) pro realizaci energetických toků v buňce?
Využívá-li organismus tzv. redukční ekvivalent v podobě anorganické sloučeniny, vžil se pro tento typ metabolismu pojmenování lithotrofní metabolismus. Nahrazuje-li anorganický redukční ekvivalent ekvivalentem organickým, označuje se tento metabolismus jako organotrofní. S ohledem na skutečnost, že v drtivé většině případů je zdrojem uhlíku a jiných stavebních složek stejná látka jako zdroj redukčního ekvivalentu, preferuje se při klasifikaci metabolismu první dělení. Jinými slovy na příkladech: drtivá většina biodegradačních mikroorganismů jsou heterotrofní bakterie, rostliny patří do skupiny autotrofních organismů apod. Nicméně např. u tzv. lithotrofních

denitrifikačních bakterií se zdůrazňuje jiný redukční ekvivalent (např. sulfidy), aby se odlišil od zdroje uhlíku, jímž je oxid uhličitý, např. v podobě hydrogenuhlíčitanů.

- Jakým způsobem získávají mikroorganismy energii na životní projevy a růst?
Existují dva základní způsoby opatření energie pro fyziologické projevy, zachycení světelné energie prostřednictvím speciálních buněčných kompartmentů (rostliny, sinice) a získání energie oxidací chemické látky (nejčastěji kyslíkem, ale také jinými akceptory elektronů). První skupina se označuje fototrofní, druhá chemotrofní.

Pro snazší pochopení se nabízí uvedení konkrétních příkladů. *Chemo(organo)heterotrofní* bakterie získávají uhlík, redukční ekvivalent a energii z organických látek. *Chemolithoautotrofní* bakterie (veškeré bakterie, které oxidují síru, železo, amonné ionty nebo mangan) si redukci a energii zajistí z anorganických látek, uhlík jim supluje zabudovávání oxidu uhličitého. Naopak *chemo(litho)heterotrofní* mikroorganismy nedokáží fixovat oxid uhličitý, a proto své buněčné tělo musí stavět z jim dostupných jednoduchých organických látek. Do této skupiny patří organismy, které dovedou fixovat dusík (hlízkaté bakterie symbioticky žijící s vikvovitými rostlinami). V praxi se však většinou lze setkat s důrazem na zdroj uhlíku a na zdroj energie, a na faktor redukčního ekvivalentu se neklade tak velký důraz, není-li to nutné rozlišovat. Proto celkový počet mikroorganismů ve vzorku životního prostředí se označuje jako počet chemoheterotrofních, popř. heterotrofních mikroorganismů.

Tvárnost mikrobiálního metabolismu je nedožrnná, nad rámec tohoto textu by bylo zaměřování pozornosti na atypické skupiny, které jako svůj akceptor elektronů mohou využívat radionuklidy (uranylové anionty), fumarát, thiosíran nebo arseničnany. Bakterie odkládající elektrony na chlorované uhlovodíky disponují tzv. halorespirací. Co však velmi podstatné je a zdůrazněno být musí, to je schopnost některých mikrobiálních jedinců přepínat svůj metabolismus v aerobním

biotechnologie

biotechnologie

a anaerobním respiračním modu, resp. disponovat schopností fermentovat nebo aerobně respirovat. Vždy je preferovaná energeticky výhodnější forma metabolismu, tedy aerobní respirace. Nicméně nastane-li změna podmínek (vyčerpání kyslíku), bakterie nebo kvasinky (typické pro kvasné procesy) neumírají, ale přizpůsobí se dané situaci. S ohledem na vztah kyslíku je dobré upozornit na mechanismus sporulace, což je obranný nástroj některých striktních anaerobů, jak přežít v podmínkách, kde se dočasně objevil kyslík. Typickým představitelem této schopnosti je rod *Clostridium*.

SHRNUTÍ

Smyslem tohoto příspěvku je co nejširšímu spektru čtenářů zpřístupnit základní mikrobiologické principy, vnést do nich systém a v konečném důsledku vyvolat zájem o další (konkrétní) rozšíření těchto informací. V kontextu přirozené atenuace to je více než na místě, s přihlédnutím k nesmírné pestrosti, jíž nositelé biodegradačního potenciálu disponují a o které se příroda opírá v rámci vlastních možností vyrovnat se s přítomností kontaminace ve svých složkách.

