

# ÚLOHA SEKUNDÁRNÍCH METABOLITŮ ROSTLIN V BAKTERIÁLNÍ DEGRADACI ORGANICKÝCH XENOBIOTIK

LUCIE MUSILOVÁ, ONDŘEJ UHLÍK,  
MARTINA MACKOVÁ a TOMÁŠ MACEK

Ústav biochemie a mikrobiologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 3, 166 28 Praha 6.  
lucie.musilova@vscht.cz, ondrej.uhlik@gmail.com,  
tomas.macek@vscht.cz

Došlo 10.11.11, přepracováno 5.6.12, přijato 18.6.12.

Klíčová slova: bioremediace, PCB, PAH, sekundární metabolity, exudáty

## Obsah

1. Úvod
2. Sekundární metabolity rostlin
3. Přírodní látky a jejich vliv na mikrobiální degradaci organických xenobiotik
  - 3.1. Přírodní látky v kořenových exudátech a jejich vliv na mikrobiální degradaci organických kontaminantů
  - 3.2. Terpeny
  - 3.3. Fenolové látky
4. Závěr

## 1. Úvod

Rozvoj naší společnosti s sebou přinesl širokou škálu nových chemických sloučenin, které se dostávají také do životního prostředí, ať už úmyslnou aplikací, průmyslovým používáním či během nehod při zpracování, dopravě atd. U některých z těchto látek dochází k akumulaci v prostředí a mnohdy mohou být transportovány na dlouhé vzdálenosti, protože je organismy odbourávají jen s velkými obtížemi. S tímto faktem pak souvisí i skutečnost, že jsou tyto látky také ukládány v tělech organismů a ohrožují je svou toxicitou.

Dekontaminace postižených oblastí je možná pomocí fyzikálně-chemických postupů, které zahrnují vytěžení materiálu, jeho odvoz a např. spalování v pecích. Tento postup má ale hned několik nevýhod, mezi které patří devastace a změna rázu krajiny, vznik meziproduktů s vyšší toxicitou než má původní kontaminant a také vysoké náklady<sup>1</sup>. Uvedené skutečnosti vedly ke snaze vyvinout efektivní technologie využívající přirozený metabolický potenciál rostlin (fytořemediace) nebo mikroorganismů žijících v jejich rhizosféře (rhizoremediace) k odstraňování takovýchto látek z životního prostředí<sup>2,3</sup>.

## 2. Sekundární metabolity rostlin

Existují metabolické dráhy, které probíhají jen v některých biologických druzích nebo jen určitých fázích jejich vývoje, a mohou být typické pro některé tkáně nebo skupiny buněk. Tyto dráhy jsou označovány jako sekundární metabolismus<sup>4</sup>. Sekundární metabolity stejně jako primární metabolity mohou hrát velmi významnou roli pro produkující organismus. Mají několik rozličných biologických funkcí – mohou sloužit jako přenašeče informací (hormony, transmittory), efekторы jiných organismů (barviva, vůně, atraktanty, antibiotika, insekticidy, toxiny), faktory pro využívání ekologických situací (chelatační činidla, antibiotika, inhibitory antibiotické aktivity) a také jako skladovací formy odpadních produktů primárního metabolismu<sup>4</sup>.

Sekundární metabolity rostlin sloužící pro komunikaci a k obraně mohou být, společně s dalšími nízkomolekulárními látkami, vylučovány ve formě rostlinných exudátů pomocí kořenů do okolní rhizosféry<sup>5</sup>. Jako součást exudátů byly identifikovány fytoalexiny, které slouží k ochraně rostlin před stresem, fyto siderofory využívané k získání esenciálních živin a fytoanticipiny sloužící jako antimikrobiální látky<sup>7</sup>. Zastoupení jednotlivých látek v exudátech se liší podle druhu rostliny, a některé tyto sloučeniny mohou fungovat jako zdroj uhlíku, dusíku a energie pro bakterie obývající rhizosféru v závislosti na druhu rostliny a potřebách mikroorganismů<sup>6</sup>.

Exudáty se také podílejí na utváření vzájemných vztahů mezi různými organismy. Rostliny ovlivňují složením svých exudátů chemické vlastnosti okolní zeminy, čímž mění probíhající chemické reakce a složení bakteriálních společenstev. Společně s produkcí fytotoxinů a jejich vylučováním do rhizosféry mohou exudáty sloužit jako jeden z prostředků mezidruhové konkurence. Látky obsažené v exudátech mohou ale také sloužit ke komunikaci a napomáhat sousedním rostlinám odolávat patogenům přítomným v prostředí<sup>5</sup>. Rostliny ovlivňují mikroorganismy a také hmyz žijící v prostředí jejich kořenů. Pozitivní vztahy zahrnují symbiózu např. s mykorrhizními houbami a bakteriemi osidlujícími rhizosféru, negativní naopak parazitující bakterie a plísňe nebo hmyz.

Veškeré tyto vztahy jsou velmi dynamické, často dochází k jejich změnám a pro jejich udržení je třeba neustálé adaptace. Býložravci působí změny v produkci těkavých látek v rostlině, kterou napadli, mikrobiální společenstva ovlivňují produkci fenolových látek v rostlině i jejich kořenech. Některými vylučovanými látkami rostliny podporují mykorrhizní společenstva a endofytní houby, které mohou zpětně ovlivnit růst rostliny a její rezistenci ke stresu a škůdcům<sup>6</sup>. Tyto interakce a nutnost porozumění signálům vysílaným rostlinami pravděpodobně přímo souvisí

s evolucí katabolických enzymů, které se podílejí na degradaci polutantů díky strukturální podobnosti některých z nich se sekundárními metabolity<sup>7</sup>.

Sekundární metabolity rostlin se do půdy dostávají také při rozkladu odumřelých kořenů nebo při jejich sezónní obměně<sup>8</sup>. A díky jejich velkému množství a různorodosti se očekává, že ne všechny sekundární metabolity stimulují rhizoremediaci stejně efektivně<sup>9</sup>.

Rostliny samotné jsou však také schopné degradace organických xenobiotik, čehož se dá efektivně využít v procesu fytořemediace, která představuje levnou a společensky přijatelnou alternativu odstraňování kontaminace ze zeminy. Jako každá metoda má však i své nevýhody. Mezi ty hlavní patří skutečnost, že vlivem toxicity prostředí dochází k menšímu nárůstu biomasy, kontaminanty uložené v listech se při opadávání mohou uvolnit zpět, a také existuje možnost vzniku toxičtějších metabolitů xenobiotik před jejich uložením v rostlinných buňkách<sup>2</sup>.

### 3. Přírodní látky a jejich vliv na mikrobiální degradaci organických xenobiotik

Tato studie shrnuje vliv rostlin a jimi produkováných přírodních látek (terpenů a fenolových látek včetně flavonoidů) na úbytek organických kontaminantů, jako jsou polychlorované bifenyly a polyaromatické uhlovodíky ve vzorcích kontaminovaných zemin.

#### 3.1. Přírodní látky v kořenových exudátech a jejich vliv na mikrobiální degradaci organických kontaminantů

Díky schopnosti rostlin produkovat obrovskou a různorodou skupinu látek, které jsou často obsaženy v exudátech, jsou prováděny také experimenty zkoumající vliv celých rostlin na mikrobiální degradaci organických xenobiotik.

Yi a Crowley<sup>18</sup> se ve své studii zaměřili na vliv 43 rostlin na úbytek pyrenu a benzo[*a*]pyrenu z půdy. Z testovaných rostlin měly pouze 4 stimulační účinek, nejlepší efekt byl pozorován u celeru. U této rostliny byly jako specifické látky identifikovány terpeny (včetně limonenu) a deriváty salicylové kyseliny, nicméně autoři neprokázali jejich vliv na stimulaci degradace v případě obohacování půdy jejich chemicky čistými formami. Společným faktorem nejúčinnějších rostlin, byla vysoká koncentrace kyseliny linoleové, která patří mezi nejrozšířenější mastné kyseliny. Mechanismu jejího působení nebyla v tomto článku věnována pozornost, ale může zodpovídat za pozitivní nabohacení hlavních degradérů, nebo pravděpodobněji slouží jako surfaktant zvyšující biologickou dostupnost polyaromatických uhlovodíků pro mikroorganismy.

Rezek a spol.<sup>19</sup> se ve svém experimentu věnovali studiu vlivu břízy bělokoré, moruše červené a jílkou vytrvalého na úbytek polyaromatických uhlovodíků (PAU) ze zemi-

ny. V této práci nebyly zkoumány specifické látky produkované dřevinami a travinou zodpovědné za zvýšení degradace PAU. Porovnání různě vegetovaných mikrokosmů (vegetace dřevinami, kombinací dřevin a traviny, hnojené nebo nehnojené a kontrolní) poukazuje na to, že hlavní roli v degradaci PAU ve studované zemině hraje pravděpodobně půdní mikroflóra. Nejlépe byly degradovány polyaromatické uhlovodíky pyren a fluoranthren, které také byly v zemině nejvíce zastoupené, jinak byl úbytek PAU ve všech mikrokosmech srovnatelný.

Další studie<sup>9</sup> byla zaměřena na mikroorganismy žijící v kořenových systémech dospělých stromů přímo v dlouhodobě kontaminované zemině za účelem identifikace rostlin schopných podporovat degradaci PCB a porozumění složení bakteriálních konsorcií schopných dlouhodobě rhizoremediace. Kontaminovaná oblast byla pokryta travinami, bylinami a rostlo na ní 6 stromů – borovice černá, jasan ztepilý, dvě břízy bělokoré, vrba jíva a trnovník akát. Po celé kontaminované oblasti byly nalezeny mikroorganismy schopné degradovat PCB, jejich počet a složení nekolísalo, kromě rhizosféry borovice, kde v období od srpna do listopadu došlo ke zvýšení počtu PCB degraderů, a bříz, kde došlo naopak ke snížení jejich počtu. Množství mikroorganismů se lišilo v závislosti na vzdálenosti od povrchu, což je pravděpodobně způsobeno délkou kořenů jednotlivých rostlin, a tím tedy i hloubkou, do které jsou schopné vylučovat své exudáty.

Uhlík a spol.<sup>20</sup> se ve své práci věnovali studiu bakterií schopných metabolizace bifenyly v půdě kontaminované PCB v rhizosféře křenu selského. V experimentu byla využita metoda značení stabilními isotopy<sup>21,22</sup>, která umožňuje studium bakterií aktivně metabolizující bifenyly. Aktivní populace se ve vegetované zemině liší od kontroly. Jako dominantní byla ve vegetované zemině identifikována bakterie rodu *Hydrogenophaga*. U tohoto rodu se již dříve podařilo charakterizovat<sup>23</sup> další bakterii schopnou metabolizace bifenyly a kometabolizace mono- až trichlorbifenyly za nízké teploty. Dále byly identifikovány některé bakterie z řádu *Burkholderiales*; z tohoto řádu je důkladně prozkoumáno mnoho kmenů s dobrými schopnostmi degradovat PCB<sup>24–26</sup>. Tato práce demonstrovuje skutečnost, že kultivace rostlin a rostlinný druh má vliv na složení mikrobiálních společenstev a jejich metabolismus.

V naší laboratoři byl také zkoumán vliv sekundárních metabolitů limonenu, naringinu a kyseliny kávové na bakteriální degradaci PCB v dlouhodobě kontaminované zemině. Použité látky stimulovaly úbytek kontaminantů a po vyhodnocení výsledků byly sekundární metabolity v čisté formě nahrazeny přírodními materiály – kůrou citronu (limonen), kůrou grepu (naringin) a hruškami (kyselina kávová). Při použití přírodních materiálů nebyla degradace stimulována tak efektivně jako v případě čistých forem sekundárních metabolitů, což naznačuje, že přírodní materiály mohou kromě stimulačních látek obsahovat zároveň látky potlačující degradační aktivitu přítomných mikroorganismů nebo látky antimikrobiální.

### 3.2. Terpeny

Terpeny představují přírodní látky odvozené ze spojení jednotek isoprenu různými způsoby; biologická syntéza vychází z isopentenylidifosfátu a dimethylallyldifosfátu. Oba prekurzory vznikají kondenzací tří jednotek acetylkoenzymu A. Terpeny se dělí podle počtu isoprenových jednotek na monoterpeny (spojení 2 isoprenových jednotek), seskviterpeny (3 isoprenových jednotek), diterpeny (4 isoprenové jednotky), sesterterpeny (5 isoprenových jednotek), triterpeny (6 isoprenových jednotek) a polyterpeny. Monoterpeny a seskviterpeny jsou tvořeny především v rostlinných pletivech, vyšší terpeny se vyskytují v rostlinných pletivech i živočišných tkáních. Mnohé z nich mají významnou biologickou úlohu, jsou součástí rostlinných silic a pryskyřic<sup>10</sup>.

Nejdůležitějším zástupcem monoterpenů je geraniol, který slouží jako prekurzor dalších terpenů a také je využíván v kosmetice při výrobě parfémů. Z hlediska stimulace rhizoremediace je významný především limonen, který se vyskytuje v kůře citrusových plodů, kmínové silici a silici indických trav *Andropogon nardus*, ze které se také získává. Limonen je prekurzorem karvonu produkovaného mátou, koprem a kmínem.

Bylo provedeno několik pokusů využívajících terpeny ke stimulaci degradace organických xenobiotik.

Hernandez a spol.<sup>11</sup> zkoumali vliv přírodních materiálů obsahujících terpeny – kůry pomeranče, listů břechťanu, jehličí borovice a listů eukalyptu – na snížení obsahu PCB v zemině kontaminované směsí Aroclor 1242. Po půlroční inkubaci došlo ve všech zeminách s přidávkou přírodních materiálů ke kompletní mineralizaci, zatímco v kontrolní zemině byl patrný pouze rozklad nížechlorovaných kongenerů.

Singer a spol.<sup>12</sup> v roce 2000 popsali vliv karvonu a surfaktantů na bioremediaci půdy kontaminované stejnou směsí PCB Aroclor 1242 pomocí bakteriálních kmenů *Arthrobacter* sp. B1B a *Ralstonia eutropha* H850, jejichž růst byl nejprve indukovan bifenyly. Surfaktanty zde sloužily jako zdroje uhlíku a zvyšovaly biologickou dostupnost PCB. Jako nejvýhodnější z testovaných surfaktantů se jevil sorbitantrioleát (ST), který je půdními mikroorganismy snadno degradován a nepředstavuje tak další toxikologickou zátěž pro prostředí. Různé kombinace přidávku karvonu a fruktosy vykazovaly srovnatelnou účinnost degradace, zatímco při použití inokula obou bakteriálních kmenů došlo k rozšíření spektra odbourávaných kongenerů. Další studie<sup>13</sup> se věnovala vlivu terpenů, bifenyly a hydroxypropyl- $\beta$ -cyklodextrinu na aerobní degradaci PCB. Autoři použili dvě různé zeminy lišící se obsahem organických látek a dusíku. Z výsledků je patrné, že přidávané sekundární metabolity rostlin mají srovnatelný efekt jako osvědčený induktor bifenyl. Přídavek hydroxypropyl- $\beta$ -cyklodextrinu vyvolal větší úbytek tetra- a pentachlorovaných PCB v zemině s vyšším obsahem organických látek. Společná kombinace výše uvedeného surfaktantu společně s bifenyly vyvolala naopak snížený úbytek.

Další experiment<sup>14</sup> se věnoval studiu vlivu limonenu

a karvonu na schopnost bakteriálního druhu *Pseudomonas stutzeri* degradovat směs Delor 103. Při použití glukosy jako zdroje uhlíku došlo po indukci limonem k odbourání srovnatelného množství výšechlorovaných kongenerů jako v kontrole, odbourání níže chlorovaných kongenerů bylo po indukci limonem zvýšeno. Indukce karvonem o nižší koncentraci byla srovnatelná s indukcí limonem, při zvýšení koncentrace karvonu došlo k zastavení biodegradace. Využití glycerolu jako zdroje uhlíku vedlo k menšímu úbytku PCB, ale bylo rozšířeno spektrum degradovaných kongenerů. Tento experiment poukazuje na skutečnost, že použité koncentrace používaných sekundárních metabolitů a stupeň chlorace přítomných kongenerů PCB hrají významnou roli v biodegradaci.

McLoughlin a spol.<sup>15</sup> se zaměřili na vliv limonenu a  $\alpha$ -pinenu, hlavní rostlinné látky vylučované do lesní půdy, na mineralizaci 2,4-dichlorfenolu (hlavní katabolický produkt degradace rozšířeného herbicidu a kontaminantu půdy i vody 2,4-dichlorfenoxyoctové kyseliny<sup>16</sup>). Zemina pro tento experiment byla odebrána ze tří různých vegetačních typů vylučujících isopren a monoterpeny – z okolí borovice lesní, dubu letního a směsi trav rostoucích na rašelině. Mineralizace 2,4-dichlorfenolu v jednotlivých typech půdy se významně nelišila, nicméně  $\alpha$ -pinen měl lepší vliv než limonen v travnaté půdě a v zemině z okolí borovice.

### 3.3. Fenolové látky

Fenolové látky představují další početnou skupinu sekundárních metabolitů. Tyto látky vznikají šikimátovou cestou, stejně jako aromatické aminokyseliny. Tato dráha probíhá u mikroorganismů a rostlin, ale u zvířat ne. Centrálním metabolitem je šikimová kyselina, která vzniká kondenzací fosfoenolpyruvátu a D-erythrosa-4-fosfátu. Ze šikimové kyseliny dále vznikají aromatické aminokyseliny, benzoové kyseliny a skořicové kyseliny. Modifikace těchto látek vedou k syntéze ligninů a lignanů, fenylypropanů a kumarinů<sup>17</sup>.

Dalším sledem reakcí vzniká také 2,3-dihydroxybenzoová kyselina, která je součástí enterobaktinu, silného sideroforu nalezeného v bakterii *E. coli* a dalších gramnegativních bakteriích. Siderofory jsou sloučeniny důležité pro získání dostatečného množství železa z prostředí ve formě využitelné pro růst mikroorganismů<sup>17</sup>.

Další významnou sloučeninou vznikající šikimátovou dráhou je *p*-aminobenzoová kyselina, která je součástí kyseliny listové (vitamin B<sub>9</sub>)<sup>17</sup>.

L-Phe a L-Tyr slouží jako prekurzory skořicové kyseliny a jejích derivátů (např. kyseliny kávové, ferulové nebo sinapové). Tyto kyseliny jsou dále využívány jako prekurzory pro vznik ligninu (rostlinný polymer zesilující buněčné stěny rostlinných buněk sloužící také jako zásoba aromatických látek). Monomery využívané pro vznik ligninu jsou druhově závislé, ale většinou jde o skořicový alkohol, koniferylalkohol a sinapylalkohol. Spojování těchto jednotek je umožněno činností peroxidas. Monomery koniferylalkoholu mohou být spojovány pouze mezi sebou a jejich

dimery jsou označovány jako lignany<sup>17</sup>.

Skořicová kyselina a její deriváty mohou podléhat také redukci za vzniku sloučenin označovaných jako fenylpropanoidy. Příkladem je skořicový aldehyd obsažený v kůře skořicovníku, který se využívá v potravinářství jako koření a aroma. Podobně olej z hřebíčkovce kořeného obsahuje vysoké množství eugenolu, který je využíván jako anestetikum v zubní medicíně<sup>17</sup>.

Benzoové kyseliny mohou vznikat z intermediátů na počátku dráhy nebo alternativně z derivátů skořicové kyseliny. Tímto způsobem vzniká např. kyselina salicylová využívaná jako účinná látka v aspirinu<sup>17</sup>.

Hydroxylací derivátů skořicových kyselin vznikají kumariny, mezi které patří dikumarol s antikoagulačními účinky (předchůdce warfarinu používaného v současné době). Lineární formy jsou označovány jako psoraleny a mají schopnost vyvolávat pigmentaci kůže, díky čemuž jsou využívány v kosmetických přípravcích na opalování<sup>17</sup>.

Z esterů skořicové kyseliny a koenzymu A jako výchozích látek vznikají polyketidovou syntézou stilbeny, které mohou být dále prodlužovány stejnou cestou za vzniku flavonoidů. Flavonoidy jsou mezi rostlinami velmi rozšířené a často se vyskytují ve formě glykosidů. Většina flavonoidů obsahuje fenylbenzopyronové jádro a liší se v počtu a umístění hydroxylových skupin. U těchto sloučenin je znám antioxidantní účinek (nejsilnější je znám u kvercetinu obsaženého v rostlinných pletivech ve vysoké koncentraci), který je využíván jako prevence kardiovaskulárních chorob nebo některých forem rakoviny<sup>17</sup>.

I v případě fenolových látek byl studován jejich vliv na stimulaci degradace organických xenobiotik. Např. Luo a spol. ve výše zmíněné studii<sup>13</sup> zkoumali vliv kumarinu a naringinu se závěrem, že některé flavonoidy mají obdobný účinek na indukci mikrobiální degradace PCB jako terpeny a bifenyly.

#### 4. Závěr

Z uvedených příkladů studií vyplývá, že při využití rostlin<sup>9,19,27–29</sup> a jejich exudátů dochází v porovnání s kontrolami ke zvýšenému odbourávání kontaminantů. Tento nárůst se liší zejména v závislosti na vlastnostech použité zeminy a biologické dostupnosti kontaminantu, i když vliv jednotlivých rostlin a látek obsažených v jejich exudátech je také patrný.

Až do nedávné doby většina studií pracovala pouze s tzv. „kultivovatelnými“ mikroorganismy, případně byly vyhodnocovány pouze analytické výsledky úbytku PCB vlivem všech přítomných mikroorganismů. Účinek samotných asepticky pěstovaných rostlin bylo možno vyhodnotit pomocí tkáňových kultur<sup>30</sup>. Ovšem roli dosud nekultivovatelných mikroorganismů bylo možno objasnit až v posledních letech s rozvojem metagenomických přístupů<sup>31</sup> – zejména nových sekvenčních technologií, zavedení rutinních postupů izolace půdní DNA či RNA a rovněž značení stabilními izotopy.

Na základě výše uvedených faktů je velmi pravděpodobně možné vytipovat podmínky vyhovující konkrétnímu prostředí zahrnující rostliny schopné růstu v dané oblasti, případně přírodní látky, které by mohly nahradit jejich přítomnost, a přitom měly stejný podpůrný efekt, bakteriální kmeny, které nejlépe reagují na dostupné sloučeniny a jsou schopny efektivní degradace.

*Práce vznikla za finanční podpory projektu GAČR 525/09/1058 a EU projekt MINOTAURUS (FP7-KBBE-2010-4/265946).*

#### LITERATURA

- Demnerová K., Macková M., Speváková V., Beranová K., Kochánková L., Lovecká P., Ryslavá E., Macek T.: *Int. Microbiol.* 8, 205 (2005).
- Macek T., Macková M., Káš J.: *Biotechnolog. Adv.* 18, 23 (2000)
- Macková M., Dowling D., Macek T.: *Phytoremediation and Rhizoremediation. Theoretical Background.* Springer, Dordrecht 2006.
- Vodrážka Z.: *Biochemie.* Academia, Praha 1999.
- Bais H. P., Weir T. L., Perry L. G., Gilroy S., Vivanco J. M.: *Annu. Rev. Plant Biol.* 57, 233 (2006).
- Singer A. C., Crowley D. E., Thompson I. P.: *Trends Biotechnol.* 21, 123 (2003).
- Singer A. C., Thompson I. P., Bailex M. J.: *Curr. Opin. Microbiol.* 7, 239 (2004).
- Leigh M. B., Fletcher J. S., Fu X., Schmitz F. J.: *Environ. Sci. Technol.* 36, 1579 (2002).
- Leigh M. B., Prouzová P., Macková M., Macek T., Nagle D. B., Fletcher J. S.: *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 2331 (2006).
- Klouda P.: *Základy biochemie.* Pavel Klouda, Ostrava 2005.
- Hernandez B. S., Koh S.-C., Chial M., Focht D. D.: *Biodegradation* 8, 153 (1997).
- Singer A. C., Gilberts E. S., Luepromchai E., Crowley D. E.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 54, 838 (2000).
- Luo W., D'Angelo E. M., Coyne M. S.: *Soil Biol. Biochem.* 39, 735 (2005).
- Tandlich R., Břežná B., Dercová K.: *Chemosphere* 44, 1547 (2001).
- McLoughlin E., Rhodes A. H., Owen S. M., Semple K. T.: *Environ. Pollut.* 157, 86 (2009).
- Hayward S., Muncey R. J., James A. E., Halsall C. J., Hewitt N. C.: *Atmos. Environ.* 35, 4081 (2001).
- Dewick P. M.: *Medicinal Natural Products.* J. Willey, Chichester 2009.
- Yi H., Crowley D. E.: *Environ. Sci. Technol.* 41, 4382 (2007).
- Rezek J., in der Wiesche C., Macková M., Zdražil F., Macek T.: *Int. J. Phytorem.* 11, 66 (2009).
- Uhlík O., Ječná K., Macková M., Vlček Č., Hroudová M., Demnerová K., Pačes V., Macek T.: *Appl. Environ. Microbiol.* 75, 6471 (2009).

21. Uhlík O., Ječná K., Macková M., Leigh M. B., Demnerová K., Macek T.: *Chem. Listy* 102, 474 (2008).
22. Uhlík O., Ječná K., Leigh M. B., Macková M., Macek T.: *Sci. Total Environ.* 407, 3611 (2009).
23. Lambo A. J., Patel T. R.: *J. Basic Microbiol.* 46, 94 (2006).
24. Erickson B. D., Mondello F. J.: *J. Bacteriol.* 174, 2903 (1992).
25. Kahl S., Hofer B.: *Microbiology* 149, 1475 (2003).
26. Sylvestre M., Sirois M., Hurtubise Y., Bergeron J., Ahmad D., Shareck F., Barriault D., Guillemette I., Juteau J. M.: *Gene* 174, 195 (1996).
27. Kotyza J., Soudek P., Kafka Z., Vaněk T.: *Chem. Listy* 103, 540 (2009).
28. Mackova M., Prouzova P., Stursa P., Ryslava E., Uhlík O., Beranova K., Rezek J., Kurzawova V., Demnerova K., Macek T.: *Environ. Sci. Pol. Res.* 16, 817 (2009).
29. Šíma J.: *Chem. Listy* 105, 531 (2011).
30. Burkhard J., Macková M., Macek T., Kučerová P., Demnerová K.: *Anal. Commun.* 34, 287 (1997).
31. Kotrba P., Uhlík O., Ječná K., Macková M., Macek T.: *Chem. Listy* 102, 960 (2008).

**L. Musilová, O. Uhlík, M. Macková, and T. Macek**  
(*Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Food and Biochemical Technology, Institute of Chemical Technology Prague*): **The Role of Secondary Plant Metabolites in Bacterial Degradation of Organic Xenobiotics**

This article summarizes basic information about the role of plant secondary metabolites in the remediation of polychlorinated biphenyls (PCBs). Terpenes and phenolics are discussed more in detail with focus on their ability to stimulate microbial degradation of xenobiotics. The study points out that amendments of contaminated soil with plant secondary metabolites influences the removal of organic xenobiotics from soil. Many of these experiments have provided satisfactory results that can be used to improve bioremediation techniques.