

# Obecné aspekty detoxikace iontů těžkých kovů v rostlinách

GENERAL INSIGHT INTO HEAVY METAL IONS DETOXIFICATION IN PLANTS

Jáchym Šuman, Pavel Kotrba – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Fytořremediace představují perspektivní nástroj pro odstraňování organických i anorganických polutantů ze životního prostředí, a to především díky vyšší ekologické šetrnosti a relativně nízké ceně. Fytořremediace byla již úspěšně aplikována na stanoviště kontaminované různými organickými xenobiotiky. Hlavní nevýhodou fytořremediace představuje poměrně malá rychlost procesu. Použití rostlin je oproti klasickým technikám *ex-situ* časově mnohem náročnější. Jednou z možností použití rostlin při bioremediaci v praxi je dekontaminace těžkých kovů. Současné úsilí směřuje k využití přirozených hyperakumulátorů a zejména geneticky modifikovaných rostlin upravených specificky pro účely fytořremediace. Pro další rozvoj fytořremediačních technik těžkých kovů použitelných v polních podmínkách a obzvláště využití geneticky modifikovaných rostlin je však nezbytné detailní pochopení procesu detoxikace iontů těžkých kovů v rostlinách na molekulární úrovni. Z přibližně 50 známých těžkých kovů má závažnější ekologický a toxikologický význam přibližně 16 prvků (Fe, Mo, Mn, Zn, Ni, Co, Cu, V, W, Cr, Hg, Pb, Cd, Sb, Ag, a U). Toxicita iontů těžkých kovů je v prvé řadě způsobena jejich vysokou afinitou k thiolovým skupinám. Vazbou thiolových skupin je inhibován účinek mnohých biologicky aktivních proteinů. Těžké kovy též mohou interferovat s metabolismem fyziologických iontů, např.  $\text{Cd}^{2+}$  s  $\text{Zn}^{2+}$  nebo  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  a  $\text{Co}^{2+}$  s  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  s  $\text{Mg}^{2+}$ . Dalším mechanismem toxického působení může být produkce reaktivních kyslíkových radikálů, které jsou příčinou oxidativního stresu. Při diskusi detoxikace a homeostase těžkých kovů v rostlinách je důležité mít na paměti dva aspekty: rostlinná buňka je kompartmentalizována, proto hraje důležitou roli distribuce a intracelulární transport iontů kovů mezi kompartmenty (především vakuolami) a cytoplasmou. Vyšší rostliny jsou navíc mnohobuněčné s diferencovanými orgány, mezi nimiž rovněž dochází k rozdílné distribuci iontů kovů. Mechanismy rezistence k iontům těžkých kovů primárně směřují spíše k prevenci výskytu toxických iontů kovů v rostlině, namísto reparace již vzniklých poškození. Strategie detoxikace se značně různí – od spolupůsobení mykorhizických mikroorganismů v extracelulárním prostředí, sekvestrace iontů kovů ve vakuole až po ochranu a reparaci plasmalemy. Tyto a další mechanismy rezistence k iontům těžkých kovů, především k  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  a  $\text{Ni}^{2+}$ , budou diskutovány v následujícím textu. Mykorhiza může tvořit efektivní prvek v rezistenci k toxickým iontům těžkých kovů v rostlinách. Mechanismy tohoto působení však nejsou jednoznačně určitelné – závisí na konkrétním mykorhizickém mikroorganismu, hostitelském druhu a také na působícím toxickém iontu. Mykorhiza může snižovat i zvyšovat příjem toxinů a tím ovlivňovat toleranci hostitele. Vliv mykorhizického symbiontu na toleranci k iontům těžkých kovů v rostlinách může být způsoben: adsorpcí iontů kovu na extramatricální mycelium či hyfální pochvu, omezeným přístupem kovu k rhizodermis v důsledku hydrofobicity hyfální pochvy, chelatací kovu exudáty mykorhizické houby, depozicí chelatovaného kovu

v cytoplasmě nebo vakuolách mykorhizického symbiontu a také zlepšením fyziologického stavu rostliny v důsledku efektivnějšího zásobení živinami, především fosforečnanu. Vazebné vlastnosti rostlinné buněčné stěny, a tudíž její role v toleranci k těžkým kovům, jsou značně diskutabilní. Ačkoliv na povrchu kořenů jsou buněčné stěny v přímém kontaktu s kovy v půdě, vazebná kapacita buněčné stěny je omezená a může mít jen omezený efekt na aktivitu kovu v blízkosti povrchu plasmatické membrány. Je také obtížné vysvětlit specifitu tohoto mechanismu tolerance k iontům těžkých kovů. Přidruženým procesem je vylučování kořenových exudátů kořeny rostlin. Ty mají různé funkce, mezi něž patří chelatace iontů kovů, která pak zvyšuje biologickou dostupnost některých iontů pro rostlinu. Plasmatická membrána představuje první „živý“ cíl toxického působení těžkých kovů v rostlinné buňce. Zároveň tvoří bariéru chránící buňku před vstupem toxických iontů. K narušení integrity membrány v důsledku stresu vyvolaného těžkými kovy může dojít rozličnými mechanismy: oxidací a prokřížením thiolových skupin membránových proteinů, inhibicí klíčových membránových proteinů jako je  $\text{H}^+$ -ATPasa nebo změnami v lipidovém složení a fluiditě membrány, což má přímý efekt na její permeabilitu. V rostlinách byla popsána zvýšená exprese proteinů tepelného šoku (HSP) vyvolaná ionty těžkých kovů. K nárůstu hladin HSP dochází nejspíše s cílem udržet integritu plasmatické membrány a zvýšit efektivitu reparačních mechanismů. Navíc krátký tepelný šok před expozicí iontům těžkých kovů u pokusných rostlin indukoval zvýšenou toleranci v důsledku zvýšené odolnosti plasmatické membrány. Byla též pozorována role proteinů metalothioneinů v ochraně cytoplasmatické membrány před toxickým působením iontů těžkých kovů. Na rozdíl od jednobuněčných organismů, u nichž je detoxikace iontů kovů v cytosolu zprostředkována především transportem iontů ven z buňky, je pro rostliny typická chelatace toxických iontů. Jako chelatační činidla mohou sloužit nízkomolekulární organické látky jakými jsou aminokyseliny histidin a prolin, peptidy  $\gamma$ -glutamylcysteinyl, glutathion a fytochelatin a proteiny metalothioneiny. Dalším způsobem detoxikace v cytosolu v rostlinných buňkách představuje transport iontů těžkých kovů do vakuol. Vakuoly jsou obecně místem depozice mnohých iontů kovů včetně  $\text{Cd}^{2+}$  a  $\text{Zn}^{2+}$ . Transport iontů těžkých kovů do vakuol je zprostředkován různými transportními proteiny. V *Arabidopsis thaliana* byl identifikován gen *ZAT* kódující protein z rodiny CDF účastnící se transportu  $\text{Zn}^{2+}$  do vakuol. P-ATPasa HMA3 zprostředkovává vakuolární depozici  $\text{Cd}^{2+}$  v *A. thaliana* a dalších nehyperakumulujících druhů. Dalším dokumentovaným případem je transport komplexů  $\text{Cd}^{2+}$  s fytochelatinu do vakuol, přičemž tuto akumulaci zprostředkovávají ATP-dependentní transportéry z rodiny ABC lokalizované v tonoplastu. Ve vakuole jsou komplexy  $\text{Cd}^{2+}$  s fytochelatinu stabilizovány inkorporací sulfidových iontů.

Poděkování: Podpoře grantů Centrum 1M6030 a MSM 6046137305.

**Šuman J., Kotrba P.: General insight into heavy metal ions detoxification in plant**

Phytoremediation constitutes an attractive alternative of decontamination of polluted sites primarily to conventional *ex-situ* techniques. Further development of phytoremediation and especially exploitation of genetically modified plants requires comprehensive insight into heavy metal resistance mechanisms in plants. This review is focused

on particular aspects of resistance and detoxification of heavy metals on the level of individual plant and single cell.

**Key words:** heavy metal resistance, phytoremediation, mycorrhiza, phytochelatines, metallothioneins, vacuolar deposition.

**Kontaktní adresa – Contact address:**

Ing. Jáchym Šuman, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 08 Praha 6 Dejvice, Česká republika, e-mail: [sumanj@vscht.cz](mailto:sumanj@vscht.cz)