

## VLIV NANOČÁSTIC NA ROSTLINY

TEREZA CYRUSOVÁ<sup>a,b</sup>, RADKA  
PODLIPNÁ<sup>a</sup> a TOMÁŠ VANĚK<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoř rostlinných biotechnologií, Ústav experimentální botaniky AV ČR, v. v. i., Rozvojová 263, 165 02 Praha 6, <sup>b</sup> Katedra biochemických věd, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Univerzita Karlova v Praze, Heyrovského 1203, 500 05 Hradec Králové  
vanek@ueb.cas.cz

Došlo 11.2.14, přijato 27.3.14.

Klíčová slova: cévnaté rostliny, nanočástice, nanomateriály, životní prostředí

### Obsah

1. Úvod
2. Nanotechnologie a cíleně vyráběné nanomateriály
3. Příjem, pohyb nanočástic rostlinou a jejich hromadění v rostlinných tkáních
4. Fytotoxicita nanomateriálů
5. Buněčná toxicita a genotoxicita nanomateriálů
6. Závěr

### 1. Úvod

Nanomateriály jsou důležitou rozšiřující se skupinou „nových“ kontaminantů. Vzhledem ke své malé velikosti a vysoké reaktivitě mohou mít širokospektrý dopad na životní prostředí a potravní řetězec. Ve srovnání s většími částicemi vykazují obtížně předvídatelné mechanismy toxicity. Velikost v řádu nanometrů a velký povrch dávají nanočásticím potenciál efektivněji interagovat s biologickými systémy.

Rostliny se v průběhu evoluce vyvíjely za přítomnosti přirozeně se vyskytujících nanočástic. S rostoucí produkcí záměrně vyráběných nanomateriálů se ale zvýšila pravděpodobnost jejich vlivu na životní prostředí. Tyto cíleně vyráběné nanomateriály se mohou do blízkosti rostlin dostat přímou aplikací, náhodným uvolněním do prostředí, kontaminovanou půdou či sedimenty nebo atmosférickým spadem<sup>1</sup>.

### 2. Nanotechnologie a cíleně vyráběné nanomateriály

Nanotechnologie je obecně obor, který se zabývá cílenou produkcí a využíváním struktur materiálů v měřítku několika nanometrů alespoň v jednom rozměru (0,1 až 100 nm). Mluvíme-li o nanočásticích, máme na mysli struktury, které mají v řádu nanometrů alespoň dva rozměry. Nanomateriály můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, a to na nanomateriály na bázi kovů (Au, Ag, Cu a další) a oxidů kovů (ZnO, TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, CuO a další) a nanomateriály na bázi uhlíku (uhlíkové nanotrubičky a fullereny). Tyto materiály se liší od odpovídajících běžných látek mnohem větším poměrem povrchu k objemu, v důsledku čehož mají velmi odlišné fyzikální vlastnosti.

Nanomateriály nalézají v poslední době velmi široké využití. Nacházejí uplatnění v chemickém, optickém, kosmickém průmyslu a strojírenství, v elektronice, zdravotnictví, kosmetice a v mnoha dalších oborech.

### 3. Příjem, pohyb nanočástic rostlinou a jejich hromadění v rostlinných tkáních

Rostliny interagují s půdou, vodou a atmosférickými částmi prostředí, přičemž všechny tyto složky mohou být zdrojem kontaminace nanočásticemi. Prostřednictvím potravního řetězce představují jednu z hlavních cest expozice pro konzumenty I. řádu, a proto má sledování interakcí mezi nanomateriály a cévnatými rostlinami velký význam. Jako příklad lze uvést přenos nanočástic zlata z rostliny *Nicotiana tabacum* (tabák) na jeho primárního konzumenta *Manduca sexta* (larva lyšaje sexta)<sup>2</sup>.

Nanočástice vyskytující se v atmosféře se mohou shlukovat na povrchu rostliny, pronikat do rostliny průduchy a poté se ukládat v listech nebo jiných nadzemních částech rostliny<sup>3,4</sup>. Nanočástice z půdy a sedimentů pak mohou interagovat s kořeny<sup>5,6</sup>. Po průchodu pokožkou kořene se nanočástice distribuují dále do xylému rostliny. Mohou být v rostlině přepravovány třemi různými cestami: (i) póry v buněčné stěně, (ii) apoplastem (transport mezi buněčnou stěnou a plasmatickou membránou), (iii) symplastem (plasmodezmaty)<sup>7</sup>.

Nanočástice se mohou kořenovým systémem pohybovat intra- i extracelulárně dokud nedosáhnou xylému. Transportu vnějších látek apoplastem z kůry do stéle brání Caspariho pružky<sup>7,8</sup>. Nanočástice ale mohou tuto bariéru překonat přechodem přes poškozené endodermální buňky nebo přes vzrostný vrchol kořene<sup>9,10</sup>. Po dosažení cévního systému, mohou být transportovány do nadzemní části rostliny transpiračním proudem<sup>11</sup>.

Na základě studií lze předpokládat, že nanočástice přes plasmatickou membránu přestupují do cytosolu rostlinných buněk navázáním na proteinové přenašeče, akvaporiny, iontovými kanály, endocytózou, vytvořením nových pórů (hlavně uhlíkové nanotrubičky) a mohou také vytvářet komplexy s kořenovými exsudáty<sup>1,12,13</sup>. Většina nanomateriálů na bázi kovů, které byly popsány jako přijímané rostlinami, obsahují prvky (např. Zn, Fe, Cu), pro které iontové přenašeče již existují<sup>14</sup>.

Distribuce různých nanočástic z kořenů do nadzemních částí rostlin byla zkoumána několika vědeckými skupinami. Lin a spol. se zabývali přenosem C<sub>70</sub> fullerenu z kořenů *Oryza sativa* (rýže) do stonku a listů<sup>11</sup>. Distribuce ceru v rostlině *Cucumis sativus* (okurka) pěstované v prostředí nano-CeO<sub>2</sub> byla zkoumána pomocí radioaktivně značeného <sup>141</sup>Ce (cit.<sup>15</sup>). Podle očekávání bylo mnohem více ceru nalezeno v kořenech než v nadzemních částech rostlin. Přesto se nanočástice ceru objevily i na okrajích mladých listů případně rozšířené po celých listech. Tento distribuční model je odlišný od distribuce trojmocných iontů Ce<sup>III</sup>, které se akumulují přednostně podél cév<sup>15</sup>.

Distribuce nanočástic rostlinou je závislá i na jejich velikosti. Nanočástice TiO<sub>2</sub> o velmi malých rozměrech (menší než 36 nm) se v kořenech *Triticum aestivum* (pšenice) hromadí a šíří se po všech rostlinných tkáních bez jakýchkoli změn struktury těchto tkání. Částice větší než 36 nm jsou hromaděny v parenchymu kořene, avšak nedostanou se do stéla a tudíž ani do výhonků. Toto hromadění neovlivňuje klíčení semen, nárůst biomasy ani transpiraci. Nevyvolává žádné změny ve fotosyntéze ani oxidativní stres. Nad prahovou hodnotu průměru 140 nm se již nanočástice nehromadí ani v kořenech<sup>16</sup>.

Některé studie o akumulaci ovšem přenos nanočástic z kořenů do výhonků vyvracejí. Patří mezi ně např. práce o transportu nano-ZnO v *Lolium perenne* (jílek)<sup>17</sup>, nano-TiO<sub>2</sub> (2,8 ± 1,4 nm) v *Arabidopsis thaliana* (huseníček)<sup>12</sup> nebo nano-CeO<sub>2</sub> v *Zea mays* (kukuřice)<sup>18</sup>. Protichůdné výsledky ukazují na to, jak jsou interakce mezi nanočásticemi a rostlinami výrazně ovlivňovány typem nanočástic, druhem rostliny a podmínkami experimentu.

Publikovány byly i studie zkoumající přenos nanočástic jiným směrem než z kořenů do nadzemních částí rostlin. Nanočástice železa (46,7 ± 1,7 nm) obalené uhlíkem vstříknuté do řapíku *Cucurbita pepo* (tykev) byly nalezeny jak v místě aplikace, tak i v jiných částech rostliny včetně kořenů. Po foliární aplikaci vzorku těchto nanočástic do blízkosti místa vstříknutí, byly nanočástice nalezeny v cytoplasmě epidermálních buněk, ale k migraci dále nedošlo<sup>19</sup>. Pozoruhodné je, že po ponoření kořenů do suspenze stejného vzorku se nanočástice dostaly do mnoha dalších rostlinných orgánů velmi rychle. Jako nejpravděpodobnější cesta přenosu nanočástic byl na základě pozorování u čtyř druhů rostlin, *Lycopersicon esculentum* (rajče), *Pisum sativum* (hrách), *Triticum aestivum* (pšenice) a *Helianthus annuus* (slunečnice), označen cévní systém řízený transpiračním proudem<sup>20</sup>.

#### 4. Fytotoxicita nanomateriálů

Nejčastějšími prostředky zkoumání fytotoxicity nanomateriálů jsou měření délky klíčku, délky výhonků, hodnocení elongace kořenů či produkce biomasy.

Jednou z velmi často studovaných látek ve fytotoxikologických studiích nanočástic je oxid zinečnatý<sup>21–24</sup>. Nano-ZnO (~ 4 nm) např. způsobuje inhibici růstu kořenů u *Allium sativum* (česnek). IC<sub>50</sub> (50% inhibiční koncentrace) byla Shaymuretem a spol. stanovena na 15 mg l<sup>-1</sup> (cit.<sup>24</sup>).

Výsledky studie Honga a spol.<sup>25</sup> poukazují na možnost působení nano-TiO<sub>2</sub> jako ochrany chloroplastů před stárnutím vlivem dlouhodobého osvětlení. Mechanismus pravděpodobně souvisí se signifikantním zvýšením aktivity superoxid dismutasy, katalasy a peroxidasy, což vede ke snížení množství reaktivních forem kyslíkových radikálů a malondialdehydu a v důsledku toho k uchování stability membránové struktury chloroplastu v podmínkách dlouhodobého osvětlení<sup>25</sup>. Růst kořenů byl podpořen i u sazenic *Zea mays* (kukuřice) a *Cucumis sativus* (okurka) přítomností nano-CeO<sub>2</sub>, zatímco u rostlin *Medicago sativa* (vojtěška) a *Lycopersicon esculentum* (rajče) je naopak zpomalen<sup>26</sup>. Ma a spol.<sup>27</sup> a López-Moreno a spol.<sup>26</sup> vystavili *Cucumis sativus* (okurka) a *Lycopersicon esculentum* (rajče) nanočásticím CeO<sub>2</sub> (7,2 ± 0,7 nm) o koncentraci 2000 mg l<sup>-1</sup>. Ani jedna ze skupin nenašla škodlivé vlivy nano-CeO<sub>2</sub> na *Cucumis sativus* (okurka) (druží jmenovaní<sup>26</sup> dokonce objevili, že nano-CeO<sub>2</sub> u těchto druhů podpořil růst kořenů), avšak u *Lycopersicon esculentum* (rajče) se výsledky skupin rozcházejí.

Řada prací se zabývá také vlivem nanomateriálů na bázi uhlíku. Klíčivost a růst sazenic *Phaseolus mungo* (fazole) prakticky nebyly po pětidenním působení mnohostěnnými uhlíkovými nanotrubicemi ovlivněny. U sazenic *Brassica juncea* (indická hořčice) dokonce přítomnost nanotrubičky podporovala elongaci výhonků a produkci biomasy<sup>28</sup>.

Experimenty, při nichž jsou rostliny vystavovány nanomateriálům a pro porovnání také látkám v běžné velikosti, mohou objasnit, zda je fytotoxicita nanomateriálů dána i specifickými vlastnostmi nanočástic nebo jen jejich chemickým složením. Například stříbrné a měděné nanočástice ovlivnily rostliny *Cucurbita pepo* (tykev) více než odpovídající částice běžné velikosti<sup>29</sup>. Na druhou stranu uhlíkové nanotrubičky ani nanočástice ZnO či nanočástice Si neukázaly významně rozdílný efekt od příslušných částic běžné velikosti<sup>30</sup>. Vliv nano-TiO<sub>2</sub> a TiO<sub>2</sub> o běžné velikosti na klíčení semen *Triticum aestivum* (pšenice) a růst výhonků byl různý v závislosti na koncentraci. Při koncentracích 2 a 10 ppm měla nano-TiO<sub>2</sub> pozitivní vliv na klíčení i růst výhonků oproti působení TiO<sub>2</sub> o běžné velikosti i oproti kontrolním sazenicím. Při vyšších koncentracích (100, 500 ppm) neměly ovšem nanočástice TiO<sub>2</sub> žádný efekt, případně spíše inhibiční<sup>31</sup>. Porovnávány byly také oxidy mědi, železa a ytterbia v nanoformě a v běžných velikostech. Nanočástice CuO byly pro *Landoltia (Spirodela) punctata* (okřehek) (10–15 nm)<sup>32</sup> a *Zea mays*

(kukuřice) (20–40 nm)<sup>10</sup> toxicitější než běžný CuO nebo rozpuštěné ionty Cu<sup>2+</sup>. Vyšší toxicitu nanočástic než iontů potvrzuje také Wu a spol.<sup>33</sup>. Pro semena *Lactuca sativa* (locika), *Raphanus sativus* (ředkev) a *Cucumis sativus* (okurka) není vliv nano-TiO<sub>2</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a nano-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> významný. Naproti tomu nano-CuO a nano-NiO negativně ovlivňovaly klíčení semen (EC<sub>50</sub> = 13 mg l<sup>-1</sup> resp. 28 mg l<sup>-1</sup>). Oxidy kovů v nanoformě měly ve vodném prostředí tendenci se adsorbovat na povrch semen a uvolňovat v jejich blízkosti ionty kovů, čímž se zvýšil jejich fyto-toxický účinek. Bylo ovšem také prokázáno, že toxicita nano-Ag (11 ± 0,7 nm) a nano-ZnO (11 ± 0,7 nm) při klíčení a elongaci kořenů *Zea mays* (kukuřice) a *Brassica oleracea* var. *capitata* (brukev) je ve srovnání s ionty stejných látek nižší<sup>34</sup>. Fytotoxicita nanočástic je navíc také ovlivňována poměrem povrchu k objemu semen, přičemž malá semena, např. *Lactuca sativa* (locika) jsou k působení nano-CuO a nano-NiO nejnáchylnější<sup>33</sup>.

Lee a spol. z výsledků své studie došli k závěru, že pozitivní vliv nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (~ 150 nm) na prodloužení kořenů u *Arabidopsis thaliana* (huseníček) byl způsoben zvýšenou difuzí kyslíku médiem, čímž nanočástice nepřímo usnadňují vývoj rostlin, stejně jako perlit usnadňuje růst v půdě<sup>35</sup>. V jiné studii nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Pd, nano-Au a nano-Cu ovlivnily negativně klíčení semen a raný vývoj rostlin *Lactuca sativa* (locika). Rostliny byly pěstovány v půdě, do které byly předem vpraveny nanočástice. Autoři předpokládají, že nanočástice především negativně ovlivnily složení a růst kolonie půdních mikroorganismů, čímž pak došlo i k následnému negativnímu vlivu na růst rostliny<sup>36</sup>. Další možností nepřímého ovlivnění rostlin nanomateriály je inhibice půdních proteas, katalas a peroxidas působením nano-TiO<sub>2</sub> a nano-ZnO (cit.<sup>21</sup>). Jak bylo pozorováno u *Triticum aestivum* (pšenice)<sup>21</sup>, *Allium cepa* (cibule)<sup>22</sup>, *Zea mays* (kukuřice)<sup>37</sup> a u stromů rodu *Salix* (vrba)<sup>8</sup>, nanomateriály mohou také agregovat na povrchu kořenů a tím ovlivňovat růst rostlin. Tato agregace brání volnému průchodu vody a tím omezuje transpiraci a ovlivňuje vývoj rostliny. Tento jev je nejvýraznější v případě uhlíkových nanotrubic, jejichž protáhlý tvar brání pronikání do pletiv a zároveň umožňuje snadnou adsorpci na povrch kořenů. Například vývoj sazenic *Oryza sativa* (rýže) inkubovaných ve směsi uhlíkových mnohostěnných nanotrubic (40–70 nm × 0,5–2 μm) a fullerenu C<sub>70</sub> s humusem byl zpomalen i přes to, že nedošlo k akumulaci nanočástic<sup>11</sup>. Nepřímo mohou být ovlivněny i rostlinné buňky v buněčných suspenzích. Mnohostěnné uhlíkové nanotrubic (10–30 nm × 5–15 μm) změnilly morfologii buněk *Oryza sativa* (rýže) aniž by byly akumulovány<sup>38,39</sup>. Na základě měření množství reaktivních forem kyslíku (ROS) uvnitř buněk v buněčných suspenzích, se dá říci, že mnohostěnné uhlíkové nanotrubic adsorbované na povrch buněk aktivují enzymy podílející se na vzniku ROS, což vede k tvorbě oxidativního stresu následované zahájením programované buněčné smrti. Indukce tvorby ROS by mohla souviset s hypersenzitivní reakcí, mechanismem, který rostliny využívají k obraně proti napadení biotrofními patogeny. Při této reakci rostlina produkuje ROS a tím

aktivuje místní programované odumření buněk<sup>40,41</sup>.

Publikováno bylo také několik článků zabývajících se vzájemným působením nanomateriálů a půdních mikroorganismů, ale spojení s těmito organismy je spíše hodnoceno z hlediska biodegradace nebo imobilizace nanomateriálů. Interakce nanočástic s mikroorganismy v půdě či vodě je důležitá zejména kvůli možné změně v biodostupnosti nanomateriálů pro rostliny<sup>9,42</sup>.

Lin a Xing<sup>43</sup> zdůraznili variabilitu výsledků fyto-toxikologických experimentů publikováním testů, při kterých využívali stejné rostliny i nanomateriály, jako byly použity v jiné předchozí studii<sup>44</sup> ovšem s odlišnými výsledky. Zejména popsali vliv nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (60 nm) a nano-Al (18 nm) na růst a vývoj *Lactuca sativa* (locika), *Zea mays* (kukuřice), *Cucumis sativus* (okurka), *Brassica napus* (řepka), *Raphanus sativus* (ředkev) a *Lolium perenne* (jílek). Inhibice kořenového růstu byla různá v závislosti na rostlinném druhu i sledovaných nanočásticích. Jejich výsledky byly v některých případech dokonce v rozporu s výsledky přechodných studií. Také zaznamenali, že nano-Zn (35 nm) a nano-ZnO (20 ± 5 nm) významně zpomalily růst kořenů u všech zkoumaných druhů, zatímco žádné z nich nebyly ovlivněny mnohostěnnými uhlíkovými nanotrubicemi (10–20 nm × 1–2 μm)<sup>43</sup>. Různorodost biologické odpovědi na nanomateriály byla potvrzena, když ani další studie nenašla žádný významný vliv nano-Al na růst *Lolium perenne* (jílek) nebo *Phaseolus vulgaris* (fazol obecný)<sup>45</sup>.

Jak je vidět, výsledky fyto-toxikologických testů jsou velmi variabilní a v mnoha faktech se rozcházejí. Žádný obecný mechanismus, jakým by nanomateriály působily na rostliny, dosud není znám. Z toho důvodu musí být podmínky experimentu, nanomateriály a rostliny používané při zkouškách toxicity naprosto přesně charakterizovány.

## 5. Buněčná toxicita a genotoxicita nanomateriálů

Sklon nanomateriálů překračovat buněčné bariéry a interagovat s intracelulárními strukturami je dán velmi malou velikostí a vysokou povrchovou reaktivitou. Tím se také zvyšuje jejich potenciál vytvářet buněčnou a genovou toxicitu, nejčastěji indukcí oxidačního stresu<sup>1</sup>. To potvrzuje např. Landa a spol.<sup>23</sup>. Geny *Arabidopsis thaliana* (huseníček) up-regulované po expozici nanočásticemi ZnO a směsi fullerenu (C<sub>60</sub> a C<sub>70</sub>) patří do skupiny genů kódujících proteiny typicky indukované stresem (např. glutathion-S-transferasa 11 a 16, cytochrom P450), a to jak abiotickým (oxidační stres, sůl, nedostatek vody), tak biotickým (poranění, obrana proti patogenům). Expozicí nano-ZnO down-regulované geny řídí organizaci buňky, biogenezi, translaci, tvorbu nukleosomu a procesy spojené s mikrotubuly. Směs fullerenu výrazně potlačuje transkripci genů zahrnutých v transportu elektronů a v energetických drahách. Nano-TiO<sub>2</sub> způsobuje jen mírné změny v genové expresi a to v genech zahrnutých v odpovědi na stres<sup>23</sup>. Wang a spol.<sup>46</sup> došli k závěru, že nanočástice TiO<sub>2</sub>

( $2,8 \pm 1,4$  nm) způsobují v rostlině *Arabidopsis thaliana* (huseníček) reorganizaci a eliminaci mikrotubulů následovanou zvýšenou degradací tubulinových monomerů. Stejně jako jiné látky působící narušení mikrotubulů, i nanočástice  $\text{TiO}_2$  vyvolávají u rostlin izotropický růst buněk kořenů<sup>46</sup>. Meristém kořenové čepičky *Vicia faba* (bob) používali pro hodnocení genotoxicity nanočástic stříbra (60 nm) Patlolla a spol.<sup>47</sup>. Výsledky ukázaly, že nanočástice stříbra u rostlin výrazně zvyšují výskyt chromosomálních aberací, mikrojadér a také snižují mitotický index. Pomocí kometového testu byly hodnoceny také rozdíly v genotoxicitě nanočástic stříbra v buňkách kořenů oproti buňkám výhonků rostlin *Allium cepa* (cibule) a *Nicotiana tabacum* (tabák). Pomocí transmisního elektronového mikroskopu byly také sledovány změny ve struktuře buněk. V kořenech rostlin *Allium cepa* (cibule) vystavených nanočásticím stříbra byla pozorována rozsáhlá vakuolizace, ztráta jaderné organizace, trhliny v plasmatické membráně a smrštění protoplastu. Nanočástice byly lokalizovány ve vakuolách<sup>48</sup>.

## 6. Závěr

S rozvojem nanotechnologií roste i množství nanočástic a nanomateriálů uvolňovaných do životního prostředí. Je proto nezbytné, aby toxikologie nanomateriálů držela krok s rozvojem nanotechnologických aplikací a průběžně vyhodnocovala jejich dopady. K plnému využití všech výhod nanomateriálů je třeba lépe objasnit jejich biodostupnost, toxicitu, ale i případné negativní vlivy. Vzhledem k tomu, že cévnaté rostliny blízké interagují s půdou, vodou i atmosférou a jsou neodmyslitelnou součástí potravního řetězce, měla by jim být věnována v tomto ohledu zvláštní pozornost.

Zdá se, že variabilita ve výsledcích publikovaných studií vychází z použití různých druhů rostlin a hlavně z vysoké heterogenity v rámci nanomateriálů. Mohou se lišit v mnoha vlastnostech, jako jsou např. různá struktura, velikost, chemické složení, povaha povrchu a v neposlední řadě také jejich množství.

V posledních letech bylo shromážděno mnoho údajů týkajících se chování nanomateriálů v životním prostředí. Mnoho interakcí mezi nanomateriály a prostředím je stále nejasných stejně jako mechanismy jejich působení. Je proto třeba v tomto výzkumu dále pokračovat a prohlubovat tak naše znalosti o těchto rychle se rozvíjejících materiálech.

*Práce vznikla v za podpory grantu Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR. č. LH11047 a LD 14100.*

## LITERATURA

- Rico C. M., Majumdar S., Duarte-Gardea M., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L.: J. Agric. Food Chem. 59, 3485 (2011).
- Judy J. D., Unrine J. M., Bertsch P. M.: Environ. Sci. Technol. 45, 776 (2010).
- Navarro E., Baun A., Behra R., Hartmann N., Filser J., Miao A. J., Quigg A., Santschi P., Sigg L.: Ecotoxicology 17, 372 (2008).
- Eichert T., Kurtz A., Steiner U., Goldbach H. E.: Physiol. Plant. 134, 151 (2008).
- Oberdöster G., Oberdöster E., Oberdöster J.: Environ. Health Perspect. 113, 832 (2005).
- Zhu H.; Han J.; Xiao J. Q.; Jin Y.: J. Environ. Monit. 10, 713 (2008).
- Miralles P., Church T. L., Harris A. T.: Environ. Sci. Technol. 46, 9224 (2012).
- Seeger E., Baun A., Kästner M., Trapp S.: J. Soils Sediments 9, 46 (2009).
- Nowack B., Bucheli T. D.: Environ. Pollut. 150, 5 (2007).
- Wang Z., Xie X., Zhao J., Liu X., Feng W., White J. C., Xing B.: Environ. Sci. Technol. 46, 4434 (2012).
- Lin S., Reppert J., Hu Q., Hudson J. S., Reid M. L., Ratnikova T. A., Rao A. M., Luo H., Ke P. C.: Small 5, 1128 (2009).
- Kurepa J., Paunesku T., Vogt S., Arora H., Rabatic B. M., Lu J., Wanzer M. B., Woloschak G. E., Smalle J. A.: Nano Lett. 10, 2296 (2010).
- Watanabe T., Misawa S., Hiradate S., Osaki M.: Plant Signaling Behav. 3, 603 (2008).
- Hall J. L., Williams L. E.: Exp. Bot. 54, 2601 (2003).
- Zhang Z., He X., Zhang H., Ma Y., Zhang P., Ding Y., Zhao Y.: Metallomics 3, 816 (2011).
- Larue C., Laurette J., Herlin-Boime N., Khodja H., Fayard B., Flank A.-M., Brisset F., Carriere M.: Sci. Total Environ. 431, 197 (2012).
- Lin D., Xing B.: Environ. Sci. Technol. 42, 5580 (2008).
- Birbarum K., Brogioli R., Schellenberg M., Martinoia E., Stark W. J., Günther D., Limbach L. K.: Environ. Sci. Technol. 44, 8718 (2010).
- Corredor E., Testillano P., Coronado M. J., González-Melendi P., Fernández-Pacheco R., Marquina C., Ibarra M. R., de la Fuente J. M., Rubiales D., Pérez-de-Luque A., Risueño M. C.: BMC Plant Biol. 9, 45 (2009).
- Cifuentes Z., Custardoy L., de la Fuente J., Marquina C., Ibarra M. R., Rubiales D., Pérez-de-Luque A.: J. Nanobiotechnol. 8, 26 (2010).
- Du W., Sun Y., Ji R., Zhu J., Wu J., Guo H.: J. Environ. Monit. 13, 822 (2011).
- Ghodake G., Seo Y. D., Lee D. S.: J. Hazard. Mater. 186, 952 (2011).
- Landa P., Vaňková R., Andrlóvá J., Hodek J., Maršík P., Štorchová H., Vaněk T.: J. Hazard. Mater. 241-242, 55 (2012).
- Shaymurat T., Gu J., Xu C., Yang Z., Zhao Q., Liu Y., Liu Y.: Nanotoxicology 6, 241 (2012).
- Hong F., Yang F., Liu C., Gao Q., Wan Z., Gu F., Wu C., Ma Z., Zhou J., Yang, P.: Biol. Trace Elem. Res. 104, 249 (2005).

26. López-Moreno M. L., de la Rosa G., Hernández-Viezcas J. A., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L.: *J. Agric. Food Chem.* **58**, 3689 (2010).
27. Ma Y., Kuang L., He X., Bai W., Ding Y., Zhang Z., Zhao Y., Chai Z.: *Chemosphere* **78**, 273 (2010).
28. Ghodake G., Seo Y. D., Park D., Lee D. S.: *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **5**, 157 (2010).
29. Musante C., White J. C.: *Environ. Toxicol.* **27**, 510 (2012).
30. Stampoulis D., Sinh S. K., White J. C.: *Environ. Sci. Technol.* **43**, 9473 (2009).
31. Feizi H., Moghaddam P. R., Shahtahmassebi N., Fotovat A.: *Biol. Trace Elem. Res.* **146**, 101 (2012).
32. Shi J. Y., Abid A. D., Kennedy I. M., Hristova K. R., Silk W. K.: *Environ. Pollut.* **159**, 1277 (2011).
33. Wu S. G., Huang L., Head J., Chen D.-R., Kong I.-C., Tang Y. J.: *J. Pet. Environ. Biotechnol.* **3**, 1 (2012).
34. Pokhrel L. R., Dubey B.: *Sci. Total Environ.* **452-453**, 321 (2013).
35. Lee C. W., Mahendra S., Zodrow K., Li D., Tsai Y. C., Braam J., Alvarez P. J. J.: *Environ. Toxicol. Chem.* **29**, 669 (2010).
36. Shah V., Belozeroval I.: *Water, Air, Soil Pollut.* **197**, 143 (2009).
37. Asli S., Neumann P. M.: *Plant, Cell Environ.* **32**, 577 (2009).
38. Tan X. M., Fugetsu B.: *J. Biomed. Nanotechnol.* **3**, 285 (2007).
39. Tan X. M., Lin C., Fugetsu B.: *Carbon* **47**, 3479 (2009).
40. Govrin E. M., Levine A.: *Curr. Biol.* **10**, 751 (2000).
41. Heath M. C.: *Plant Mol. Biol.* **44**, 321 (2000).
42. Handy R., von der Kammer F., Lead J., Hassellöv M., Owen R., Crane M.: *Ecotoxicology* **17**, 287 (2008).
43. Lin D., Xing B.: *Environ. Pollut.* **150**, 243 (2007).
44. Yang L., Watts D. J.: *Toxicol. Lett.* **158**, 122 (2005).
45. Doshi R., Braida W., Christodoulatos C., Wazne M., O'Connor G.: *Environ. Res.* **106**, 296 (2008).
46. Wang S., Kurepa J., Smalle J. A.: *Plant, Cell Environ.* **34**, 811 (2011).
47. Patlolla A. K., Berry A., May L. B., Tchounwou P. B.: *Int. J. Environ. Res. Public Health* **9**, 1649 (2012).
48. Ghosh M., J M., Sinha S., Chakraborty A., Mallick S. K., Bandyopadhyay M., Mukherjee A.: *Mutat. Res., Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* **749**, 60 (2012).

**T. Cyrusová<sup>a,b</sup>, R. Podlipná<sup>a</sup>, and T. Vaněk<sup>a</sup>**  
 (<sup>a</sup>*Laboratory of Plant Biotechnologies, Institute of Experimental Botany, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague,* <sup>b</sup>*Department of Biochemical Sciences, Faculty of Pharmacy, Charles University, Hradec Králové*): **The Effect of Nanoparticles on Plants**

Terrestrial plants directly interact with soil, water and atmospheric parts of the environment; all these components can become a source of contamination with nanoparticles. This review presents data on the effect of nanoparticles on vascular plants. The impact of nanoparticles on plants varies depending on their nature, size, structure, chemical composition, surface properties and also their amount. The action of nanoparticles also depends on the plant species.

## UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ Fakulta logistiky a krizového řízení

pořádá  
vědeckou odbornou konferenci  
k 100. výročí použití chemických zbraní  
na téma

## HISTORIE A SOUČASNOST CHEMICKÝCH ZBRANÍ



20. a 21. květen 2015  
UHERSKÉ HRADIŠTĚ

další informace budou  
k dispozici na webové  
stránce fakulty  
[www.utb.cz/flkr](http://www.utb.cz/flkr)