



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vliv antropogenních imisí na suchozemský hmyz

ÚVOD

Vliv na rostlinu

Kvalitativní změny hostitelského stromu

Účinky na hmyzí škůdce a jejich přirozené nepřátele

Gradologie v imisních podmínkách

Typ (A) - s kulminací hustoty v silně znečištěných oblastech

Typ (B) - s vrcholem hustoty v mírně znečištěných oblastech

Typ (C) - s maximální hustotou v neznečištěné oblasti

SLOUČENINY SÍRY

Změny v rostlinách

Negativní a pozitivní vliv na hmyz

Mechanismy ovlivňující reakci na polutanty

Poškození rostlin škůdcem

Kombinované vlivy stresových činitelů

SLOUČENINY DUSÍKU

Vliv na rostlinu a hmyz

KYSELÉ SRÁŽKY

Vliv na půdní faunu

Vlivy vzájemného působení rostlina - hmyz

OZON

Změny v rostlinách

Vliv na hmyz

Reakční mechanismy

FLUOROVÉ SLOUČENINY

Změny v rostlinách

Vliv na hmyz

OXIDY UHLÍKU

ZMĚNA KLIMATU

Změny ve vegetaci

Vliv na hmyz

KOVY

Kadmium

ZÁVĚRY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vliv antropogenních imisí na suchozemský hmyz

Terestrické ekosystémy jsou kontaminovány širokým spektrem polutantů pocházejících z různých zdrojů a odlišným dosahem působení. Hmyz je tak ovlivněn přímo nebo nepřímo plynnými polutanty jako je SO_2 , oxidy dusíku, ozon, oxid uhličitý a fluor, dále kyselými srážkami, kovy, zemědělskými a průmyslovými chemikáliemi.

Především nepřímý vliv imisí na hmyz je spojován s živnou rostlinou, na kterou působí polutanty podle uvedeného schématu (Bytnerowicz 1996) a ovlivňují tak zdravotní stav jednotlivých orgánů, celých rostlin, populací a rostlinných společenstev v závislosti na rozsahu zasažené oblasti (obr. 1). Přechod plynných polutantů z atmosféry probíhá stejně jako CO_2 . Každý polutant má specifickou difusní konstantu pro pronikání, rozpouštění a přechod do vody obsažené v buněčných stěnách, membránách a samotných buňkách.

Kvalitativní změny v hostitelském stromu

Dopady imisí nelze oddělit od působení dalších přírodních stresorů v lesních ekosystémech, protože jsou příčinou bezprostředního chemického stresu, který ovlivňuje vitalitu stromů. Zhruba lze vymezit kvalitativní změny v následujících bodech:

- Obecně se snižuje vitalita a urychluje stárnutí rostliny bez specifických změn chemických vlastností. To se může vyskytnout, když je narušena fotosyntéza polutanty, které nezanechávají rezidua jako např. ozon.
- Polutant zvyšuje citlivost stromu k přírodním stresovým faktorům např. suchu nebo mrazu (SO_2 , fluor, NO_x). Rostliny jsou více poškozeny suchem a mrazem než vyvolanými chemickými změnami.
- Polutant vyvolává změny v rostlinném metabolismu, které vedou k odlišné kvalitě a kvantitě primárních nebo sekundárních složek stromu. Dochází ke zřetelnému zhoubnému účinku např. na enzymy a pigmenty v rostlině, provázené chemickými změnami.
- Akumulace polutantů a jejich metabolitů na nebo ve stromech buď povrchovou adsorbíci nebo translokací rostlinou. Proces akumulace u rostlin je dobře znám u síry, fluoru a těžkých kovů.

Reakce však mohou probíhat současně, kombinovat se a tím dochází vyvolání změn v atraktivitě stromu k hmyzu

Imise jsou nadřazeným faktorem v působení na lesní ekosystémy - entomofágní organismy, fytofágní hmyz, kvalitu lesních porostů a půdní prostředí (obr. 2).

Všechny organismy v lesním prostředí se dostávají do kontaktu s imisemi a v jejich specifické reakci se odrážejí:

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- chemismus polutantů, způsob a dynamika depozice a trvání kontaminace
- struktura vegetace, její druhové složení a poloha lokality vzhledem k transportu (proudění) polutantů
- postavení organismu v potravním řetězci a v nutričním cyklu ekosystému
- specifické nároky živočišného organismu na místo vlastního vývoje na rostlině

S tím souvisí obecné otázky:

- Mění se kvalita rostlinné potravy? Jestli tomu tak je, jakým způsobem mohou tyto změny ovlivnit herbivorní druhy?
- Ovlivňuje depozice polutantů kapacitu fytofágního hmyzu s ohledem na jeho:
 - vitalitu, reprodukci a orientaci
 - schopnost využít stresované rostliny
 - rezistenci proti predátorům, parazitoidům a patogenům?
- Jsou přirození nepřátelé schopni zasáhnout s ohledem na svůj potenciál a plnit svoji regulační funkci?

Účinky na hmyzí škůdce a jejich přirozené nepřátele

O přímém dopadu imisí na hmyz je poměrně málo informací a předpoklady působení jsou částečně v rovině úvah. Základem je kontakt s polutantem, který podobně jako insekticidy má určitý stupeň toxicity, z tohoto hlediska je entomofágní hmyz citlivější než fytofágní škůdci. Více je ohrožen hmyz pohybující se po kontaminovaném povrchu (mravenci) než druhy málo pohyblivé (savý hmyz). Ve výhodě jsou minovači v listech, pupenech, hmyz vyžírající výhony, nacházející se pod kůrou, v hálkách v porovnání s druhy volně žeroucími.

Volně žijící druhy jsou více ohroženy přijímanou potravou, neboť konzumují deponované polutanty na povrchu i uvnitř listu, zatímco minovači a savý hmyz je ohrožen pouze složkami, které penetrují do vnitřních pletiv. Tím jsou vnější konzumenti vystaveni širší škále a vyšší koncentraci polutantů. Entomofágní hmyz je intoxikován v rámci potravního řetězce a záleží na kořisti, jejím místě vývoje, stupni akumulace cizorodých látek v jejím těle.

Změnou chemismu rostliny nastává vytváření nových často velmi příznivých podmínek pro rozvoj fytofágů.

Gradologie v imisních podmínkách

Zjednodušeně nastíněné změny pod vlivem znečištění vzduchu ovlivňují rozšíření, abundanci a populační dynamiku hmyzu. Führer (1985) popisuje tři typy zvýšené populační hustoty hmyzu podél imisního gradientu (obr. 3).

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

První typ (A) - s kulminací hustoty v silně znečištěných oblastech, je běžný v silně znečištěných oblastech, zahrnuje druhy, které mají buď vysokou toleranci k polutantům, nebo způsob života, kterým se vyhýbají přímému vystavení polutantům. Přemnožení těchto druhů může být způsobeno snížením odolnosti rostlin nebo konkurentů či predátorů, kteří jsou citliví na polutanty.

Mezi zástupce vstupující v těchto podmínkách často do gradace nebo chronicky v ní setrvávající se řadí *Exoteleia dodecella*, *Rhyacionia buoliana*.

Tento vztah platí především pro hmyz sající na listech, ale byl potvrzen i u brouků, motýlů a pilatek. Nárůst populací mšic byl pozorován na lokalitách pod bezprostředním vlivem papírny, tepelné elektrárny a hutí na měď a nikl ve Finsku. Hustota nosatců *Byctiscus populi*, *B. betulae* žeroucích se na listech osiky a *Deporaus betulae*, *Apion simile* na bříze a housenek motýla *Stigmella betulicola* minující březové listy narůstala směrem k hliníkárně. Abundance *Argyresthia pygmaeella*, která se vyvíjí na pupenech břízy je zvláště vysoká na plochách přiléhajících k hutí (obr. 4b). Nárůst populačních hustot obalečů *Retinia resinella* a *Rhyacionia buoliana* poškozujících letorosty byl zjištěn v blízkosti různých typů hutí. Hustoty drsnokřídlice březového *Biston betularius* (L.) a některých jiných motýlů narostly v okolí hliníkárn, zatímco emise obsahující síru u továrny zpracovávající užitkové dřevo podpořily nárůst abundance pilatek *Scolioneura betuleti*, *Fenusa pusilla* a *Phyllotoma ochropoda* minujících v listech.

Druhý typ (B) - s vrcholem hustoty v mírně znečištěných oblastech se objevuje v oblastech mírného až nízkého znečištění, ale chybí více nebo méně v silném imisním impaktu. Jako optimální se jeví podmínky mírných nebo slabých koncentrací. Tyto druhy (např. *Phaenops cyanea*, *Ips sexdentatus*, *Pristiphora abietina*, *Ips typographus* (?)) jsou buď svým způsobem života volně vystaveny imisím nebo jsou vysoce citlivé na polutant, ale místem vývoje jsou chráněni před imisní kontaminací. Jejich nárůst může být výsledkem eliminace nebo redukce konkurentů nebo predátorů.

Tento typ změny hustoty hmyzu ve vztahu ke znečištění je méně častý než zvýšení abundance s nárůstem znečištění. Tento rozdíl by mohl být částečně vysvětlen metodologickými důvody, protože spolehlivá demonstrace nelineárního vztahu je pracnější než odhalování úbytku / nárůstu hustoty při přiblížení se k emisnímu zdroji. Vrchol hustoty v mírně znečištěné zóně byl nejčastěji zjištěn u motýlů a brouků. Minovači *Eriocraniidae* (obr. 4a), obaleči potravně vázaní na břízu a mandelinka *Melasoma lapponica* jsou charakterističtí zvýšenou hustotou ve středním odstupu od vlivu hutí. Maximální hustota obalečů vyvíjejících se na borovici, *Rhyaciona pinicolana* a *Retinia resinella* byla hlášena z mírně znečištěné zóny 1 km od hutě v jižním Finsku. Hustota *Phyllonorycter populifoliellus* minujícího na listech topolu dosáhla vrcholu 1 km od cementárny.

Třetí typ (C) - s maximální hustotou v neznečištěné oblasti, zahrnuje druhy, které běžně napadají stresované rostliny, ale nevyskytují se v oblastech vystavených znečištění vzduchu. Tyto druhy mohou být vysoce citlivé na znečištění vzduchu a vedou zpravidla volný, nechráněný způsob života. Nejsou schopni využít stresovaných hostitelských druhů v oblasti středně nebo silně znečištěné (*Pityocteines curvidens*).

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tento vztah je typický pro druhy, které jsou citlivé na polutanty, nebo které ztrácí zdroj potravy v důsledku působení imisí (lišejníky). Úbytek populační hustoty byl hlášen u některých mandelinkovitých, motýlů živících se na lišejnících a obaleče *Blastesthia turionella* žeroucího na borovici. Úbytek hustoty obaleče vyvíjejícího se na bříze, *Eulia ministrana* monitorovaného feromonovými pastmi v impaktu huti (obr. 4d) je překvapující, protože ostatní obaleči vykazovali maximální hustotu v mírně i silně znečištěných oblastech.

SLOUČENINY SÍRY

Nejdůležitějšími polutanty obsahujícími síru jsou kysličník siřičitý (SO₂) a sirovodík (H₂S). Kysličník siřičitý je produkován přirozeně vulkanickými emisemi a lesními požáry. Avšak většina SO₂ v ovzduší pochází ze zdrojů antropogenních především spalováním fosilních paliv. Celkové roční emise vzrostly z 5 milionů tun v r. 1860 na více než 180 milionů tun v polovině osmdesátých let.⁵⁰²

Změny v rostlinách

Kysličník siřičitý je fytotoxický a proniká do rostlin stomaty. Krátkodobá expozice může vyvolat poškození tkáně - nekrózu, zatímco chronické poškození vede k předčasnému opadu nebo chloróze listů. Dlouhodobé vystavení nižší hladině SO₂ způsobí ztráty na přírůstu i když jasné symptomy na listech chybí. Znečištění vzduchu také indukuje biochemické změny v rostlinách nárůstem celkové rozpustného dusíku a obsahu volných aminokyselin v tkáních. U výhonků borovice lesní byla celková koncentrace volných aminokyselin a argininu výrazně v korelaci se vzdáleností od celulózky, zatímco u smrku ztepilého glycin, ornithin, lysin a histidin měly významnou negativní korelaci. Změny v koncentraci karbohydrátů v listech mohou prohloubit citlivost rostlin k nemocem v důsledku vysoké nebo nízké hladiny cukrů. Glukóza a fruktóza byla výrazně zvýšená v jehličí borovice lesní a smrku ztepilého v blízkosti průmyslového závodu emitujícího hlavně SO₂, zatímco v koncentraci sacharózy a škrobu nenastaly změny.

Environmentální činitelé modifikují reakci rostliny na SO₂. Větší stomatální otevřenost podmíněná vysokou teplotou nebo intenzitou světla, zvyšuje příjem polutantu a citlivost rostliny na SO₂.

Negativní a pozitivní vliv na hmyz

Oxid siřičitý může být škodlivý pro řadu druhů hmyzu ve vysokých koncentracích a někdy i při běžné úrovni v ovzduší. Snižuje letovou aktivitu i péči o potomstvo včel *Apis mellifera*. U housenek bource morušového klesá spotřeba potravy provázená nestejným růstem, opožděným kuklením, měkknutím kutikuly.

Pozitivní vývoj populací mšic sajících na lesních dřevinách stresovaných vzdušnými polutanty síry a fluoru nastal u druhu *Cinara pini*, *C. pinea* a *Protolachnus agilis*, ale opačná reakce byla pozorována za stejných podmínek u *Schizolachnus tomentosus* a *Pineus pini*. V blízkosti emitentů síry a těžkých kovů byly *Cinara* spp. mnohem četnější v silně a středně znečištěných borových porostech než ve slabě zasažených. V okolí papírny vypouštějící hlavně oxid siřičitý nevzrostl počet mšic *Schizolachnus pineti* na borovici lesní ve srovnání s kontrolami, zatímco reprodukce *Cinara*



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

pilicornis na smrku ztepilém (*Picea abies*) byla výrazně rychlejší na lokalitách 0,2 a 0,5 km od zdroje znečištění, než na mnohem vzdálenějších stanovištích. Korovnice *Sacchiphantes abietis* a mšice *C. pilicornis* sají běžně na smrku ztepilém ve znečištěných oblastech.

Působení různých koncentrací SO_2 na vazbu mezi mšicí a hostitelskou rostlinou není dostatečně znám. Střední relativní růstová rychlost mšice *Macrosiphon rosae* sající na rostlinách rostoucích v prostředí městského vzduchu výrazně vzrůstá ve srovnání s mšicemi ve filtrované atmosféře. Jestliže krytokoženné semenáčky smrku sitka byly před nasazením mšice *Elatobium abietinum* fumigovány $100 \text{ nl.l}^{-1} \text{ SO}_2$, růstová rychlost mšice vzrostla a kulminovala jako odraz reakce na tří hodinovou prefumigaci. Růstová rychlost stoupala s koncentrací SO_2 (90 a 110 nl.l^{-1}) až k maximu o 11% převyšujícímu kontrolu. Příčinou úbytku mšice *Acyrtosiphon pisum* při vyšších koncentracích SO_2 může být částečně přímý toxický vliv plynu na hmyz. Hladiny běžně nacházející se v terénu více odpovídají koncentracím, které zvyšují růstovou rychlost u mšic.

Mechanismy ovlivňující reakci na polutanty

Množství síry přijaté hmyzem živícím se na rostlinách závisí na potravním typu konzumenta a obsahu síry, stejně jako na množství plynných sirných sloučenin v atmosféře, které mohou proniknout do těla pokožkou a dýchacím systémem. Někteří hmyzí fytofágové jsou vysoce tolerantní, ale nadbytek sirných sloučenin obvykle ovlivňuje aktivitu enzymů, závislých jak na NAD (nikotin amidadenindinukleotid), tak na FAD (flavin amidadenindinukleotid).

Mortalita housenek prvních instarů běkyně velkohlavé vzrůstá, vývoj se prodlužuje a hmotnost klesá už při atmosférické koncentraci $0,2 \text{ mg.m}^{-3} \text{ SO}_2$. Při chovu běkyně vrbové vzrůstající koncentrace SO_2 vede ke zvýšené aktivizaci některých cytoplazmatických a mitochondrických enzymů.

V rostlinném materiálu po vystavení SO_2 nastává vzestup rozpustného dusíku, který je limitujícím prvkem pro populace mšic z hlediska jejich růstu a reprodukce. Byla prokázána pozitivní korelace mezi plodností mšic a listovou koncentrací rozpustného dusíku v hostitelské rostlině. Odrůdy hrachu náchylné k napadení mšicí *Acyrtosiphon pisum* obsahují vyšší koncentrace volných a celkových aminokyselin než odrůdy odolné. Subnekrotické hladiny SO_2 zvýšily populace mšice *Sitobion avenae* v terénu. Mechanismus pro takový vzestup vede přes zvýšenou dostupnost rostlinného rozpustného dusíku pro mšice.

Nárůst koncentrací volných aminokyselin v jehličí smrku ztepilého souvisí s poškozením způsobeným fluorovodíkem i jinými vzdušnými polutanty nebo stresy v životním prostředí. Přemístění volných aminokyselin jako výsledek degradace listového proteinu nebo změny v aminokyselinovém metabolismu zvyšuje hladinu dostupného dusíku v lýku. Toto je mechanismus vysvětlující nárůst savého hmyzu na stresovaných dřevinách.

Sekundární rostlinné sloučeniny fenoly, monoterpény mohou působit jako potravní odpuzovače (detergenty) pro fytofágy živící se na jehličí jehličnanů.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Poškození rostlin škůdcem

Poškození hmyzem může zvýšit citlivost rostliny na atmosferické polutanty. Významným škůdcem smrku sitka je mšice *Elatobium abietinum*, v důsledku jejího sání se snižuje růst hlavní větve a kořenové suché hmoty. Krátkodobé vystavení smrku SO_2 zvýšilo její růstovou rychlost. Za dva měsíce v laboratorních podmínkách populace mšice vzrostla 250krát na rostlinách zavlažovaných a fumigovaných SO_2 ve srovnání s 80-násobkem na rostlinách zavlažovaných, nefumigovaných. Populační hustota byla srovnatelná a odpovídala stanovištím se středním až silným znečištěním. Samotný vliv nízkých koncentrací SO_2 (25 nl.l^{-1}) nebyl pro smrk sitka významný, ale mezi SO_2 a mšicemi byla významná interakce.

Kombinované vlivy stresových činitelů

Vývoj populace mšice *C. pilicornis* sající na smrkových výhoncích se urychlil v přírodních i uměle vytvořených imisních podmínkách. Jestliže semenáčky smrku ztepilého byly vystaveny imisím aplikovaným jednotlivě i ve směsích např. plynný SO_2 , NaF, a $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ nebo $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ve vodních roztocích výrazně zvýšily počty mšic na semenáček. Neprojevily se žádné výrazné rozdíly v koncentraci volných aminokyselin ve stoncích výhonků mezi kontrolou a ošetřením fluorem, avšak relativně nízká koncentrace argininu v ošetření fluorem na konci růstové sezóny by mohla potvrdit poruchy v nitrogenním metabolismu smrkových semenáček.

Kombinované ošetření SO_2 s postřikem vodními polutanty zaznamenalo vzájemně propojený vliv na rozvoj mšic. Simulovaný kyselý déšť zvýšil reprodukci mšic *Euceraphis betulae* na bříze, když bylo počasí sušší než normálně, ale žádný vliv nebyl pozorován, když byly srážky nad normálem.

SLOUČENINY DUSÍKU

Plynné dusíkaté polutanty zahrnují amoniak (NH_3), oxid dusný (N_2O), oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). V ovzduší je NO oxidován ozonem na NO_2 . Spalování fosilních paliv je největším antropogenním zdrojem oxidů dusíku (NO_x).

Dusík je také hlavní složkou hnojiv. Imisní sloučeniny dusíku jsou často živinami pro rostliny. V nízkých dávkách zvyšují jejich růst a v nadměrném množství však mohou způsobit poruchy růstu. Emise amoniaku se uvolňují v prostředí intenzivního chovu dobytka, vepřů a drůbeže, kožešinových zvířat, při výrobě umělých hnojiv a průmyslu. Sloučeniny dusíku mohou také nepřímo ovlivnit kyselost půdy.

Pod vlivem amoniakálních sulfátových aerosolů, plynného amoniaku a oxidů dusíku začaly borové porosty hynout v blízkosti továrny na výrobu dusíkatých hnojiv, kde spad jasně zvyšoval růstovou rychlost borovic a velikost jehlic, které se staly citlivějšími k vysychání v průběhu zimy. Jemný prach zablokoval stomatální otvory a jamky, čímž se narušila výměna plynů na jaře a dokonce ještě v létě.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vliv na rostlinu a hmyz

Znečištění vzduchu podél dálnice má největší dopad na okolní rostliny a změnilo rovnováhu rostlina-hmyz ke škodě nebo ve prospěch fytofágního hmyzu.

Snížená stomatální difúzní rezistence umožňuje rostlině příjem polutantů ze vzduchu kolem dálnice. Po fumigaci rostlin NO_2 dochází k intenzivnější redukci rozpuštěného NO_2 na amoniak a následnou přeměnu na aminokyseliny, což se projevilo ve vyšších koncentracích proteinů. NO_x jsou rovněž asimilovány do organických sloučenin, když trpí rostliny nedostatkem anorganického dusíku v půdě.

Zvýšené koncentrace organického dusíku v listech a lýku hostitelské dřeviny rostoucí v prostředí vzduchu u dálnic představuje podstatné zlepšení kvality výživy pro fytofágní hmyz.

Výrazný nárůst populace mšice *Aphis fabae* nastal na dvou hlavních hostitelích (*Viburnum opulus* a *Phaseolus vulgaris*) v podmínkách znečištěného vzduchu ve srovnání se vzduchem filtrovaným¹⁵⁵ (Obr. 2). Převládající imise NO a NO_2 měly silný dopad na metabolismus dusíku u zasažených rostlin. Narůstající koncentrace dusíku a celkových aminokyselin v listech a míze vyvolala pozitivní změny v kvalitě potravy pro mšice.

KYSELÉ SRÁŽKY

Dopady atmosférické acidifikace se různí od lokálních případů vysoké toxicity po rozsáhlou, nižší, dlouhodobou, pozvolnou intoxikaci.

Kyselé srážky silně ovlivnily životní prostředí v Evropě a v Severní Americe. Kyselé aerosoly ve formě mženi a mlh se tvoří ve vysokých výškách, sráží se na vegetaci a způsobují „spálení listu“ a poruchy pupenů; v tomto ohledu jsou jehličnany zvláště zranitelné. Po celé minulé století koncentrace vodíkových iontů v půdě narůstaly; kdysi latentní tlumící potenciál půdy byl překročen, vytvořila se kyselá vrstva, která poškozuje kořenový systém (zejména vyluhováním základních živin včetně draslíku, hořčíku a vápníku a uvolněním iontů toxických kovů jako hliníku, manganu, kadmia), což vede k odumření stromů (zvláště jehličnanů s mělkým kořenovým systémem) a k útlumu přirozené regenerace rostlin citlivých na kyselost.⁵⁵⁴

Kyselé mlhy mohou mít na rostliny vliv pozitivní, stejně jako škodlivý. Vlhké ukládání polutantů na listový povrch může buď působit jako hnojivo nebo postupně vyvolat buněčný kolaps a makrobiotické poranění,¹³⁶³ zvětrávání kutikulárního vosku, vyluhování listů a modifikací fyziologických reakcí. K přímým vlivům kyselých srážek náleží např. stimulace životnosti zimujících vajíček hřebenule ryšavé, která se zvyšovala s rostoucí kyselostí (obr. 4).

Vliv na půdní faunu

Negativní dopad umělé acidifikace lesní svrchní půdní vrstvy na hmyz a pavouky se projevilo sníženou abundancí dvou druhů střeblíků a pavouka *Trochosa terricola* na nejkyselějších stanovištích.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Souběžně byli v těchto podmínkách zachyceni ve vysokém zastoupení pavouci *Euryopis flavomaculata* a drabčící druhu *Astilbus canaliculatus*.

Nápadný nárůst abundance *Collembola*, *Protura* a *Diplura* se projevil v půdě kolem bříz roztoucích na vápenci. Půda v blízkosti kmenů byla silně acidifikována ($\text{pH H}_2\text{O} < 4$) stokem srážek po kmenech. Rozdíly v kyselosti půdy na různých stranách stromů byly v korelaci s distribucí *Apterygota*. *Collembola* a *Protura* dosáhly svých nejvyšších hustot v nejkyselější půdní nise, zatímco *Diplura* se vyskytla pouze v půdě s vyšší hodnotou pH.

Vlivy vzájemného působení rostliny - hmyz

Phaseolus lunatus hostitelská rostlina můry *Trichoplusia ni* vystavená mlhám vyšší kyselosti byla charakteristická výrazně vyšší celkovou koncentrací dusíku ve srovnání s kontrolou, při níž nenastalo zlepšení hmotnosti housenek, i když dusík je často limitujícím faktorem pro hmyz. Nitrátová forma dusíku může být nevhodná pro *T. ni*. Dále testované rostliny z mlh o pH 2,0 a 2,5 vykazovaly více nekrotických oblastí, které snižovaly chutnost a stimulaci žíru. Housenky na těchto rostlinách trávily více času přecházením mezi přijatelnými oblastmi a méně času žírem než housenky na listech s minimálním poškozením. Protože je *T. ni* polyfág, forma dusíku a jeho koncentrace mezi stresovanými a nestresovanými rostlinami *P. lunatus* může být relativní vzhledem k rozmanitosti mezi druhy v širokém rozsahu hostitelů *T. ni*. Kyselé srážky měly stresující vliv na využití potravy housenkami *Agrotis ipsilon*.

Samičky mandelinky *Xanthogaleruca luteola* žeroucí listy vystavené kyselému dešti kladly výrazně méně vajíček než brouci krmení neošetřenými listy.

Aktivita mšic *Schizolachnus pineti*, *Eulachnus agilis*, *Cinara pini* sajících na borovici byla výrazně zvýšena v podmínkách simulovaného kyselého mlžení (obr. 5). Růstová rychlost nymf všeobecně vzrostla o 10 až 20% a 100% nárůst byl zaznamenán u *C. pini*. Poškození jehlic borovic chlorotickou skvrnitostí, která je prvním symptomem budoucího opadání jehličí, byla výrazně zvýšena u *E. agilis*.

Vliv simulovaného kyselého deště na reprodukci a přežití mšice *Euceraaphis betulae* na bříze *Betula pendula* byl odrazem snížené odolnosti stromu k mšicím, které produkovaly o 40% až 100% i více potomstva. Rozmnožování mšic na břízách ovlivněných kyselými srážkami bylo zvýšeno, když byly srážky pod dlouhodobým průměrem, což naznačilo vzájemnou interakci mezi stresem způsobeným kyselým ošetřením a obdobím sucha.

Ke korigování vztahu rostlina-fytofág přistupuje navíc možnost, že kyselé srážky nepřímo ovlivňují hmyz přes jeho nemoci nebo parazitoidy např. je známa redukce citlivosti housenic hřebenule ryšavé *N. sertifer* na virus jaderné polyedrie.

OZON

Ozon je nejdůležitější fytotoxický vzdušný polutant nejen ve Spojených státech, ale stává se středem pozornosti ve světě. Srovnání globální distribuce potenciálních fotochemických smogových oblastí a lesních oblastí vymezilo důležité geografické zóny s předpokládaným ohrožením lesů. Ozon

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

je přítomen jak v troposféře, tak ve stratosféře. Troposférický ozon je produkován hlavně cestou fotochemických reakcí zahrnujících hypotetické elementární částice, které vznikaly přírodními procesy a ve značně větší míře lidskou činností. Existuje doklad o narůstání troposférických ozonových koncentrací. Avšak za troposférický ozon se považuje pouze 10% vertikálního ozonového sloupce nad zemským povrchem, zatímco za stratosférický ozon se počítá zbývajících 90%. Ke ztrátám stratosférického ozonu dochází působením stoupajících polutantů uvolněných v přírodním procesu i lidské činnosti. Tyto ztráty mohou vyústit v podstatné změny v množství UV radiace ovlivňující zemský povrch.

Ozon se tvoří v troposféře přeměnou oxidu dusičitého (NO_2) v oxid dusnatý (NO) působením slunečního záření. Uvolněný atom kyslíku reaguje s molekulami kyslíku (O_2), aby utvořil ozon (O_3). Normálně je reakce oboustranná a existuje rovnovážný stav mezi ozonem, oxidem dusičitého a oxidem dusnatým. Unikající výfukové plyny reagují s oxidem dusnatým a zastavují zpětnou reakci tak, že ozon se akumuluje.

Změny v rostlinách

Troposférický ozon je vysoce fytotoxický. Ozon vstupuje do rostlin hlavně otevřenými průduchy během dne. Vystavení rostliny ozonu může vyústit v poškození akutní i chronické nebo může ovlivnit růst a produkci s nebo bez vizuálních příznaků.^{570, 887, 1273, 1497, 1548} Běžné symptomy akutního listového poškození ozonem zahrnují skvrny, tečkování, narušení pigmentace, chlorosu a předčasné stárnutí. Teplo, sluneční světlo, vysoká relativní vlhkost, dobrá výživa, vhodná půdní vlhkost a jiné faktory jsou potřebné k tomu, aby bylo eliminováno poškození ozonem.⁸⁸⁷ Ve Spojených státech ozon způsobuje na rostlinách více škod než jakýkoli jiný vzdušný polutant.^{887, 1502}

Ozon zasahuje několika způsoby do základních metabolických procesů rostlin, které vedou ke snížení fotosyntézy a tím translokace asimilátů od výhonků ke kořenům, což může zpětně ovlivnit mykorrhizu a zvýšit stárnutí kořenů a následně ovlivnit produkci vlivem redukováného příjmu vody a minerálů. Vstupem do listů přes stomata ozon působí na rostlinné blány a buněčné struktury jako jsou chloroplasty, což vyústit ve strukturální poškození a v některých případech v předčasné stárnutí, které může vést k uvolnění rozpustných dusíkatých sloučenin z rostlinných strukturálních forem v listových tkáních.

Vliv na hmyz

Fumigace ozonem může vyvolat opačné reakce na podobné druhy hmyzu živící se na různých potravních rostlinách nebo u odlišných druhů hmyzu živících se na stejných potravních rostlinách. Toto prostě odráží konfliktní reakci rostlin na fumigaci ozonem.

Ozonové vzdušné znečištění mění vzájemné působení hmyzu a patogenů s jejich hostitelskými rostlinami a projevuje se ve změně žíru hmyzu, ovipozici a plodnosti, růstu, vývoji, vitalitě, aktivitě rostlinných patogenů a reakci škůdců.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ozonem oslabené borovice *Pinus ponderosa* se staly citlivějšími pro napadení kůrovci *Dendroctonus brevicomis*, *Dendroctonus ponderosae*. Stromy poškozené ozonem a dosud nenapadené kůrovci měly snížený pryskyřičný tlak, výron a průtokovou rychlost, zvýšenou pryskyřičnou krystalizaci. Všechny tyto jevy byly spojeny s rostoucí atraktivitou pro kůrovce. Ale napadené stromy neumožnily odpovídající produkci potomstva. Takto může imisní poškození být kontraverzní neboť zvýšená atraktivita je provázána sníženou vhodností hostitele.

Dopředu ozonem fumigované listy jsou preferovány a rychlost růstu fytofága se zvyšuje ve srovnání s listy kontrolními. Dospělci *E. varivestis* se raději živily na vyřezaných listových discích *Glycine max* v laboratoři, když byly listy předtím fumigovány vzduchem obohaceným koncentracemi ozonu mezi 25 nl.l^{-1} a 114 nl.l^{-1} . Účinek byl zjistitelný do 23 dnů, poté co fumigace skončila a reakce byla závislá na dávce ozonu. Housenky bekyně velkohlavé dávaly rovněž přednost fumigovaným listům z dubu *Quercus alba*.

Gravidní samičky mandelinky *Gastrophysa viridula* žeroucí na ozonem fumigovaných rostlinách *Rumex obtusifolius* kladly více vajíček v kratším časovém období než samičky na kontrolních rostlinách. Líhnutí larev nebylo ovlivněno, ale životnost larev až ke kuklení byla zřetelně lepší a celkový nárůst populace byl o 50% vyšší na fumigovaných rostlinách ve srovnání s kontrolními. Plocha listů sežraná vyvíjejícími se larvami přepočtená na hmotnost vylíhlého imaga byla více než dvakrát vyšší na kontrolních rostlinách než na rostlinách fumigovaných. Fumigované listy byly buď relativně výživnější než listy kontrolní nebo měly snížené obranné mechanismy.

Preference žíru a kladení vajíček u importované mandelinky *Plagiodera versicolora* byla stanovena pro dva klony topolu *Populus deltoides* vystavené jednotné akutní dávce ozonu nebo dřevěným uhlím filtrovaného vzduchu. Ozonová dávka neměla výrazný vliv na růst rostliny, ani nevytvořila žádné viditelné poškození na biotestovaném listovém materiálu. (obr. 8). Larvy i dospělci *P. versicolora* vyhledávali k žíru listy stresované ozonem proti kontrole, naproti tomu samičky kladly vajíčka především na listy neovlivněné ozonem. Změny v preferenci se vyskytovaly trvale.

Růst populace *Aphis fabae* na *Ph. vulgaris* byl tlumen ozonem (40 nl.l^{-1}), zatímco *Phyllaphis fagi* na buku byla stimulována. Akutní ozonová dávka (200 nl.l^{-1}) nevyvolala žádný účinek v životnosti, reprodukci nebo vývoje mšice *Chaitophorus populicola* sající na topolu. Fumigace vikve *Vicia faba* 85 nl.l^{-1} ozonem způsobila snížení růstu mšice, *Aphis fabae*, zatímco vyšší koncentrace stimulovaly růst mšice, neboť se zvýšilo stárnutí hostitelské rostliny.

Reakční mechanismy

Plynné polutanty vzduchu vyvolávají v rostlinách biochemické změny. Zvýšená koncentrace aminokyselin a jiných dusíkatých sloučenin je důsledek působení ozonu.^{1187, 1490} Dusík je často limitující živinou v růstu fytofágního hmyzu a jeho zvýšená dostupnost zlepšuje růst a reprodukci hmyzu.^{1028, 1229} Ozon může ovlivnit nutriční hodnotu hostitelských rostlin pro hmyz nebo měnit její morfologii tím, že ji činí méně vhodným stanovištěm pro reprodukci.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stupeň atraktivity hostitele pro hmyz může být dán změnami fyzikálních vlastností rostlinné chlorózy, pigmentace, atd. nebo změnami rostlinného metabolismu. Odchytky v preferenci hostitele se vyskytly primárně již vlivem neviditelných změn s narůstající koncentrací ozonu. Výběr živné rostliny brouky byl ovlivněn zvýšenou koncentrací cukrů a volatilních sloučenin v listech vyvolanou působením ozonu.

Zvýšená spotřeba potravy mandelinkou *Plagioderia versicolora* na rostlinách vystavených ozonu by mohla být kompenzačním mechanismem užívaným imagem, aby se vyrovnalo se sníženou kvalitou potravy - listů fumigovaných topolů.²⁹⁴ Kompenzační spotřeba se vyskytla u řady druhů hmyzu chovaných na rostlinách s nižší nutriční kvalitou.^{564, 997, 1376} Například můra *Pseudoplusia includens* zvýšila svou spotřebu potravy, aby získala adekvátní dusík na rostlinách vystavených oxidu uhličitému.

Ozónová fumigace topolů změnila dynamiku fytofágních škůdců. *Chaitophila populicola*, *Melamporidium medusae*, *P. versicolora* se vyvíjí na topolu ve stejné geografické oblasti, preferují k vývoji podobné listy a vyskytují se a reprodukují v průběhu období růstu topolu.²⁹⁵ Toto vyvolává potravní konkurenční prostředí mezi těmito škůdci.²⁹⁵ Larvy *P. versicolora* užívají k „obraně“ methylcyclopentanoidní monoterpen, aby odpudily fytofágy, kteří se vyskytují současně.¹²⁶¹ Jestliže jsou populace *Ch. populicola* drženy na nízké úrovni v důsledku potravní konkurence s *M. medusae* nebo *P. versicolora* akutní vystavení topolů ozonu by mohlo vyústit ve zvýšenou dostupnost listové tkáně pro mšici *Ch. populicola* a následně zvýšit její potenciál. To proto, že vystavení topolu ozonu snižuje reprodukční schopnost druhých dvou škůdců, kteří užívají stejného listového zdroje.

Změny v nutriční kvalitě hostitelské rostliny mohou ovlivnit růst a vývoj hmyzu, který se na ní živí. Ozónová fumigace vede k nárůstu hladiny volných aminokyselin, rozpustných proteinů, rozpustných cukrů, fenolových sloučenin a jiných metabolitů, které mohou být využity hmyzem jako zdroje potravy. Význam zvýšených koncentrací snadno dostupných forem dusíku pro vývoj hmyzích fytofágů je značný. Dostupnost dusíku ovlivňuje takové základní životní procesy jako růstovou rychlost, vitalitu a reprodukční kapacitu.

Dopad změny koncentrace aminokyselin indukované ozonem je významný pro populace hmyzu. Z aminokyselin pokládaných za důležité pro růst hmyzu³⁴⁴ se koncentrace methionu a valinu výrazně lišily u ozonového listí. Poněvadž růst *L. lycopersicella* nebyl zpomalen přechodnou redukcí v koncentraci methionu a hodnota koncentrací valinu vzrostla, změny v těchto aminokyselinách nebyly omezující. Relativně již malé změny v koncentracích volných aminokyselin mohou mít výrazně negativní vliv na vývoj hmyzu. Potenciálně kritické změny v koncentracích volných aminokyselin se objevily u klíčových doplňkových aminokyselin, z nichž všechny značně narůstaly v ozonovém listí rajčat. Alanin, glycin, kyselina asparágová a serin byly hlášeny jako důležité růstové faktory pro housenku bource morušového,⁷⁴⁸ zatímco prolin byl hodnocen jako středně významný pro bource morušového a kritický pro vývoj mnoha dvoukřídlých.

FLUOROVÉ SLOUČENINY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Fluor je široce rozšířen v přírodních ekosystémech, ale ve vyšším zastoupením může být škodlivý pro rostliny i zvířata. Znečištěný vzduch poskytuje hlavní zdroj zvýšené hladiny fluoru v rostlinách. Toto znečištění může pramenit ze zahřívání jílu, skal, uhlí nebo rud obsahujících fluor, uniká z vápenek, továren na fosfátová hnojiva, uhelného a jiného průmyslu.

Změny v rostlinách

Kromě nekrózy a chlorózy na listech fluor způsobuje také metabolické změny v rostlinách. U rostlin vystavených fluoru byly zjištěny změny ketokyselin, organických kyselin, aminokyselin, amidů, volných cukrů, peroxidu, DNA a RNA, fosforu a škrobů a neškrobových polysacharidů.

Působení fluorovodíku indukuje nárůst koncentrace volných aminokyselin v jehličí smrku *Picea abies*. Relativně nízká koncentrace argininu po fluorovém ošetření na konci růstové sezóny by mohla potvrdit poruchu v metabolismu dusíku smrkových semenáčků. Arginin je hojněji obsažen v listech nezasažených. *Cinara pilicornis* se nerozmnožovala v laboratoři na smrkových řízcích, které obsahovaly vysoké koncentrace argininu. Tato aminokyselina může být indikátorem výživné hodnoty hostitelské rostliny pro mšice na jehličnanech.⁷⁰⁰

Vliv na hmyz

Populace bourců, včel, některých kůrovců (*Pityokteines* sp.) a obaleče prýtového (*Rhyacionia buoliana*) byly nižší v oblastech znečištěných fluorem. Populace makadlovky *Exoteleia dodecella* narůstala v oblastech znečištěných fluorem v jižním Norsku. Zvýšenou koncentraci fluoru v bezprostředním okolí hliníkárn vykazovaly saprofágové následovníci predátory, omnivory a herbivory.

Fluor a jeho sloučeniny mohou vstoupit do těla hmyzu nejen s potravou, ale např. u včelí dělnice výhradně dýcháním a může se hromadit až do kritické koncentrace 110 mg.kg⁻¹ při níž včela hyne.

Blanokřídli mají tendenci akumulovat poměrně vysoké koncentrace fluoru ve srovnání s jinými druhy hmyzu. Fluor stanovený ve střevu housenic hřebenule borové (*Diprion pini*) byl přičítán povrchové kontaminaci jehličí, ale u kukel se již nevyskytoval.

Pozitivní korelace existuje mezi napadením smrku ztepilého korovnicí *Sacchiphantes abietis* a koncentracemi fluorových imisí.

Snížení populace kůrovce *Pityokteines* spp., *Cryphalus* spp. a nosatce *Pissodes piceae* nastalo v jedlových porostech poškozených fluorem, zatímco populace mšic *Dreyfusia piceae*, *D. nusslini* vzrostly. Červec *Cryptococcus* sp. spojovaný s houbou *Nectria* sp. na bucích ve Francii dosahoval různé abundance naznačující komplexní vzájemné působení s fluorem a jinými polutanty.³⁷⁰

Fluorovodík může zvýšit mortalitu, délku vývoje, snížení velikosti housenky a kukly, plodnost samic *Lymantria dispar* a *Orgyia antiqua*. Zvýšené koncentrace fluoru (až do 365 ppm) vyústily ve

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

sníženou hmotnost housenek, zvýšenou až 75% úmrtnost a zpožděný vývoj (obr. 9). Snížený larvální růst měl za následek až 55% úbytek hmotnosti kukly. Staré listy moruše obsahovaly více fluoru než listy mladé. Když překročila koncentrace fluoru ve vzduchu $1,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$, dosáhly koncentrace fluoru v listech moruše více než 30 ppm ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Práh toxicity akumulovaného fluoru byl pro larvy bource nad 30 ppm a letální dávka 120-200 ppm. Koncentrace fluoru do 30 ppm neměla zřejmý vliv na mortalitu bource, ale při 30-50 ppm dosahovala mortalita více než 30%.

Morušové listy kontaminované fluorem omezily růst a vývoj bource. Po šesti dnech chovu při koncentraci fluoru 20 až 30 ppm se snížila živá hmotnost housenek asi o 15%, při 50-60 ppm o více než 60% s nelineárním vztahem mezi hromaděním fluoru a larválním růstem. Listy obsahující více než 80 ppm fluoru vážně narušily produkci zátoček bource. Hmotnost zátočku se ukázala být citlivější na fluor než živá hmotnost larvy. Žír listů obsahujících 15 až 20 ppm vedl k produkci zátoček, které byly o 25% lehčí než kontrolní. Mezi tvorbou zátoček bource a koncentrací fluoru v listech moruše v různých vzdálenostech od znečišťujícího zdroje byla úzká korelace.¹⁵⁴⁹

Znečištění fluorem zejména ovlivňuje rozvoj mšic na jehličnanech. Smrk ztepilý má histologicky viditelné obranné reakce proti korovnici, které vystavení fluoru snižuje a tak zlepšuje vitalitu korovnic.

OXIDY UHLÍKU

Ukazuje se, že koncentrace atmosférického CO_2 trvale stoupá¹⁵³ a tento trend odpovídá růstu globální spotřeby a spalování fosilních paliv.¹³⁰⁴ Stále pokračují rozpory, zda je biosféra v současné době zdrojem nebo místem k ukládání uhlíku. Bez ohledu na teplotní a jiné klimatické změny, vzrůstající hladina CO_2 může ovlivnit ekosystémy přímým působením na růst a vývoj rostliny. Ve sklenících se užívalo CO_2 ke zvýšení rostlinného výnosu. Mnoho rostlinných a ekosystémových atributů bude přímo nebo nepřímo ovlivněno zvýšením CO_2 .¹⁴⁴¹

Existuje hypotéza, že vysoká hladina CO_2 a následná vysoká dostupnost produktů fotosyntézy zvýší růst kořenů. Tyto budou zpětně ovlivňovat výživu rostlin zvětšením půdního objemu využitého kořeny a zvýšením mykorrhizy a tím zvýšené schopnosti vázat dusík. Míra rozkladu hrabanky může být nižší v prostředí s vysokým CO_2 , poměr C/N v tkáních rostoucích pod zvýšeným CO_2 narůstá. Tkáň s vysokým obsahem ligninu a nízkou koncentrací dusíku odumírá pomaleji.¹⁰³⁵

Rostliny pěstované v prostředí obohaceném CO_2 mají nižší koncentraci listového dusíku, což je omezující faktor výživy pro hmyzí fytofágy,⁹⁹⁷ než rostliny pěstované v běžných terénních podmínkách.^{456, 938} Potom chování a aktivita fytofágů může být modifikována reakcí na sníženou koncentraci listového dusíku. Nižší koncentrace dusíku jsou kompenzovány hmyzími fytofágy (mladé i starší instary housenek) zvýšenou mírou spotřeby o 20 až 80% ve srovnání s larvami živícími se na tkáních rostoucích pod nízkým CO_2 . U housenek chovaných na listech obohacených CO_2 se může projevit zvýšená mortalita, snížená hmotnost kukel nebo delší doba vývoje. Pomalejší růst fytofágů by mohl snížit jejich odolnost ve volné přírodě delší expozicí predátorům a parazitoidům¹²³⁴ a snížit pravděpodobnost jejich úplného vývoje.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ZMĚNA KLIMATU

Celosvětové oteplování bude spojeno s regionálními i místními změnami průměrné teploty, v rozložení teplých a studených období a v řadě jiných chemických a fyzikálních obměn včetně srážek, rychlosti vypařování, výšky hladiny moře, půdy a vody.¹¹⁹² Existuje projekt letního a zimního oteplení po celé Evropě jako důsledek zdvojené výše hladiny oxidu uhličitého s největšími nárůsty průměrných teplot v zimním období,¹⁸⁶ které by mohly dosáhnout až 6°C v severní Evropě.

Změny ve vegetaci

Přirozené klimatické změny vyústily v rozsáhlý geografický posun ve výskytu druhů, druhové skladbě společenstev a vyhynutí druhů. Jestliže se objeví prognózovaný skleníkový efekt, přirozené ekosystémy budou reagovat podobným způsobem jako v minulosti, ale dopady budou mnohem vážnější kvůli rychlému postupu předpokládaných změn. Oteplení o 3°C by nastolilo teplejší prostředí než bylo v minulých 100 000 letech; 4°C by způsobily, že by byla Země nejteplejší od období Eocénu před 40 miliony let. Takové oteplování by bylo nejen velké ve srovnání s nedávnými přirozenými fluktuacemi, ale asi by bylo 15 až 40krát rychlejší než předcházející přirozené změny. Taková rozsáhlá změna může překročit adaptační schopnost mnoha rostlinných i živočišných druhů.¹¹⁹²

Vliv klimatických změn by se projevil v lesích mírného pásu a v arktických oblastech, kde předpokládané teplotní nárůsty budou relativně velké.^{89, 1192} Ústup lesů bude vyvolán změnami teploty a srážek, frekvencí požárů, změnami v rozsahu a závažnosti škůdců a patogenů, změnami v konkurenčním vzájemném působení a přídatnými vlivy neklimatických stresů, jako jsou kyselé deště a nízká hladina kyslíku. Vážné změny se mohou také vyskytnout v tropických lesích vlivem srážkových změn. V oceánech se může projevit podobný posun v počtu druhů a složení společenstev, kdyby došlo k oteplování vody oceánu nebo ke změně vodní cirkulace.

Vliv na hmyz

Druhové spektrum se může měnit se zeměpisnou délkou i šířkou. Když se klima otepluje, druhy se posunují směrem vzhůru. Obecně dílčí nárůst v nadmořské výšce odpovídá většinou posunu v zeměpisné šířce: 3°C ochlazení při 500 m zvýšení odpovídá zhruba 250 km v zeměpisné šířce. Protože vrcholy hor jsou menší než jejich úpatí (základny), druhy posunující se vzhůru v reakci na oteplování zaujmají menší a menší prostor, mají menší populace a mohou se tak stát citlivějšími na genetické a environmentální tlaky.¹¹⁰² Druhy původně situované v blízkosti vrcholů hor by nemusely nalézt odpovídající stanoviště, na které se přesunou. Druhy žijící v Evropě během studených období nemohly zcela přežít podmínky v postglaciálních lesích. Jeden dříve široce rozšířený brouk *Aphodius hodereri* se nyní vyskytuje pouze na vysoké Tibetské náhorní rovině, kde zůstávají podmínky dostatečně studené pro jeho přežití.³¹⁸ Chvostoskok *Tetracanthella arctica* obývá primárně studenou (boreální) zónu, ale také přežívá v několika málo stanovištích na horských vrcholcích v mírném pásu Evropy.³¹⁸

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

KOVY

Kovy jsou uvolňovány do atmosféry a půdy sopkami, zvětrávajícími skalami a širokým rozsahem lidského působení. Vlivem mohutného rozptylu částic v atmosféře je půda zřídka kontaminována kovy jako důsledek vulkanické erupce. V některých případech přirozené zvětrávání skal bohatých na kovy může kontaminovat okolí, například olovem.⁵⁸⁴

Hlavními zdroji kovových polutantů z antropogenní činnosti u suchozemských ekosystémů jsou hornictví, hutnictví, spalování fosilních paliv a zemědělství.

Existují zprávy zabývající se vlivem kovů na obsah tuku, kyselou oxidaci tuků a tukové těleso, které je u hmyzu zdrojem energie. Buňky tukového tělesa se přestaly diferencovat, když 2 µg Cd na gram čerstvé váhy byly injekčně vpraveny do *Locusta migratoria* a produkce vajíček byla narušena.⁹⁸⁸ Parazitoid *Pimpla turionellae* zaznamenal nápadný úbytek obsahu tuku, když byl vystaven kadmium, zatímco obsah karbohydrátů nebyl kontaminací kovy téměř postižen.¹¹⁶⁸ Narůstající obsah tuku byl pozorován u některých druhů pavouků z oblastí znečištěných průmyslem.

Nejnápadnější vliv kontaminace kovů na lesy v blízkosti hutí je přítomnost značné vrstvy nahromaděného listového materiálu na povrchu půdy. Tento vliv byl vysvětlován téměř totální absencí žížal a mnohonožek, které byly otráveny synergickým působením nízkého pH a vysoké hladiny kovů v jejich potravě.⁷¹⁰ Tito bezobratlí normálně přispívali k dekompozici mrtvého listí na menší kousky, které jsou snadněji rozkládány mikroorganismy. Nicméně tato hustá vrstva listového opadu vytváří trvalé stanoviště pro některé další skupiny bezobratlých jako *Collembola* a roztoče, kteří zde dosahují vyšší populační hustoty na jednotku. Například počet chvostoskoků byl 20.800, larev brouků 120 a larev dvoukřídlých 4.590 na 1 m² v kovy kontaminované listové hrabance a půdě, zatímco počty na nekontaminovaných stanovištích byly výrazně nižší (8.690, 4 a 291).^{706, 710}

Mechanismus se detoxifikace kovů u hmyzu spočívá ve využití hemocytů, protože buňky hemolymfy hmyzu hrají aktivní roli ve fyziologických procesech, což vede například k detoxifikaci insekticidů.

U půdních členovců vystavených znečištění, určité kovy mohou být přeneseny a včleněny do mezibuněčných granulí spojených s epitelem středního střeva za pomoci metallothioneinových proteinů.

Kadmium

I když průmyslový význam kadmia (Cd) zaznamenal pokles jen malý podíl zpracovaného kadmia je recyklován. Většinou je přemístěno na skládky a dále rozptýleno do životního prostředí. Může být vázáno v půdě stovky let, než přejde do oceánů, kde se bude akumulovat na jejich dně. Kadmium je toxické pro všechny organismy. Rozhodující je nejen koncentrace kadmia, ale i jeho chemická forma. Kadmium se částečně vyskytuje ve formě volných iontů a částečně jako hydroxidy absorbované částicemi v organické látce. Množství vázaného kadmia závisí na půdě a jejich vlastnostech.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Acidifikace zvyšuje dostupnost kadmia a zároveň se bude větší množství kadmia vyluhovávat do hlubších vrstev půdy.

Volné ionty kadmia jsou snadno přijímány kořeny rostlin, ale mezi rostlinnými druhy existují rozdíly.⁹⁵⁶ Protože pouze malé množství kadmia je přemístěno do jiných částí rostliny, hladina kadmia je obvykle vyšší v kořenech než v kmeni nebo listech.⁷⁷⁰ Kadmium v atmosféře může přejít do rostlin přímo stomaty na listech. Dvacet až 60% kadmia v rostlině může být absorbováno pokožkou.⁷¹⁷ Je prokázáno, že koncentrace kadmia jsou vyšší v listech bylin než v listech stromů.⁹⁸⁵

Chvostoskok *Orchesella cincta* a roztoč *Platynothrus peltiferi* byli vystaveni různým hladinám kadmia v potravě (zelené řasy). U *O. cincta* kadmium převážně ovlivnilo růst samičky, aniž by mělo přímý vliv na reprodukci, zatímco u *P. peltifer* byl primární vliv na reprodukci. Příjem kadmia byl vyšší u *P. peltifer* než u *O. cincta* a vyvolal ztrátu zinku, následkem čehož měly tyto druhy odlišnou fyziologickou reakci na kadmium a populační rychlost. Populační kapacita u roztočů byla citlivá na kadmium, zatímco u chvostoskoků byla do jisté míry udržena schopnost narůstat navzdory toxickým vlivům na individuální úrovni.¹⁴⁴⁰

Množství kadmia v tkáních a orgánech pokleslo, když umělá potrava obsahovala kadmium i zinek.⁹⁹³ Rozdílné fyziologické mechanismy mohou být příčinou různých vlivů kadmia na roztoče a chvostoskoky. U *P. peltifer* kadmium rozrušilo metabolismus zinku. Protože zinek je často spojen s reprodukcí, mohl by být reprodukční útlum vysvětlen působením kadmia. U *O. cincta* kadmium potlačuje růst samiček, aniž by přímo postihlo kladení vajíček. Toxicita kadmia u tohoto druhu musí být založena na zcela odlišném mechanismu: například narušení růstových hormonů samiček. Chvostoskoci jsou schopni udržet nízkou koncentraci kovů v těle tím, že je vylučují - při svlékání pokožky odvrhují i část střeva.^{799, 1439, 1440}

Toxický vliv kadmia na *O. cincta* na individuální úrovni se neprojevuje vždy na celé populaci. Při použití detailních údajů z bionomie u *O. cincta* bylo zjištěno, že limitní hladina kadmia bez vlivu na skutečnou rychlost růstu a skutečnou výměnu biomasy byla mnohem vyšší než kritická hladina kadmia bez vlivu na individuální růst.¹⁴³⁵ Toto by mohlo vysvětlit, proč se populace chvostoskoků objevily na stanovištích, kde koncentrace kadmia v lesní hrabance převyšovala hladinu kadmia bez vlivu 0,04 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ na jedince. Současně byl na těchto stanovištích trvalý tlak na růst rezistence, což se projevuje ve zvyšujícím se vylučování kadmia.^{800, 1439}

U larvy *Drosophila* sp. koncentrace kadmia byly o 20% nižší než v jejich potravě.⁹⁸⁰ Bioakumulace kadmia byla pozorována u *N. sertifer*, *G. frutetorum* a zvláště *M. pallipes* (*Hymenoptera*, *Diprionidae*), když byly housenice chovány na jehličí znečištěném kovy.

U larev *Sarcophaga peregrina* bylo přibližně 90% akumulovaného kadmia nalezeno v zažívacím traktu, tukovém těle a Malpighických trubicích.⁴⁸ Kadmium v zažívacím traktu bylo vázáno většinou na indukující protein, který se skládal ze směsi pěti proteinů s několika vlastnostmi charakteristickými pro metallothionein. 84% kadmia akumulovaného housenkami bource morušového (*B. mori*), chovanými na uměle kontaminované potravě obsahující 8 až 80 $\mu\text{g.g}^{-1}$ Cd, se



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

nacházelo v zažívací trubici a 11% v Malpigických trubicích.¹⁴⁵⁵ Kadmium bylo primárně vázáno na indukční proteiny vysoké molekulární hmotnosti.¹⁴⁵⁸

ZÁVĚRY

Dopad znečištění na suchozemské hmyzí populace může být negativní, pozitivní nebo indiferentní a bezvýznamný. Obecně bylo pozorování v blízkém okolí zdroje znečištění spojeno s drastickou změnou struktury společenstva bezobratlých. Příkladně dočasná ztráta je závislá na intenzitě, pokrytí oblasti, trvání, frekvenci a druhu znečištění. Avšak ve většině případů jsou některé druhy hmyzu schopny tolerovat znečištění a získat výhodu z úbytku svých přirozených nepřátel nebo z biochemických změn ve stresovaných živých rostlinách.

Terénní údaje podpořené laboratorními experimenty naznačují, že suchozemští fytofágové jsou často pozitivně ovlivněni atmosférickým znečištěním.^{27, 1284, 1599} Znečištění vzduchu může ovlivnit kvalitu potravního zdroje, mít přímý vliv na hmyz nebo měnit účinnost přirozených nepřátel hmyzích druhů. Význam těchto mechanismů se odlišuje případu od případu a je spojen s intenzitou znečištění, způsobem života a žíru hmyzu a úlohou různých regulačních faktorů v populační dynamice.

Reakce fytofágního hmyzu na oxid siřičitý se jeví být pozitivně závislá na dávce a je zprostředkována hlavně změnou chemizmu hostitelské rostliny.¹⁵⁹⁹ Reakce mšic se příjmenším projevuje pozitivně na oxidy dusíku (zvláště NO). Důkazy o vlivu ozonu jsou protikladné, i když existují případy zvýšeného žíru fytofágů na rostlinách ovlivněných ozonem.^{294, 1599, 1600} Vliv zvýšeného oxidu uhličitého na hmyz byl pozitivní nebo bezvýznamný, ale reakce celých populací jsou v podstatě neznámé.

Kyselá srážky mohou způsobit významné místní a regionální změny v půdní fauně.

Toxický účinek imisí běžných kovů na půdní bezobratlé, a v důsledku toho ovlivnění dekompozice hrabanky, jsou relativně dobře známé,^{706, 800} nedostatečně jsou dokumentovány účinky na hmyz žijící ve vegetační vrstvě.