

Využití mikroorganismů (nejen) v moderním zemědělství

(The Use of Microorganisms (not only) in the Modern Agriculture)

Marta Zavřelová¹, Zuzana Antalová¹, Dominik Bleša¹, Pavel Matušinský^{1,2}

¹ Agrotest fyto, s.r.o., Havlíčkova 2787/121, 767 01 Kroměříž

² Katedra botaniky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

Souhrn: Klimatické změny prohlubují abiotické (např. vysoké teploty, sucho, mraz) a biotické stresy (např. napadení novými rasami chorob, škůdci), které ovlivňují vitalitu a produktivitu rostlin. Rostliny mají před živočichy nevýhodu v tom, že se před těmito vlivy nemohou skrýt, ale musí jim čelit přímo. Zemědělské plodiny se zemědělci snaží ochránit alespoň před biotickými vlivy chemickými přípravky na ochranu rostlin. Nicméně při současném tlaku na ekologizaci zemědělství se hledají cesty, jak snížit chemické vstupy za udržení výnosů plodin. Aplikace endofytických mikroorganismů by mohla být jednou z cest, jak pomoci rostlinám čelit těmto negativním vlivům prostředí. Tento příspěvek popisuje některé druhy endofytů a na základě již provedeného výzkumu shrnuje jejich účinky v rostlinách, které jsou prakticky využitelné v zemědělství.

Klíčová slova: endofyty, biostimulanty, houby, bakterie, viry

Abstract: Climate change is exacerbating abiotic (e.g., high temperatures, drought, frost) and biotic stresses (e.g., attacks by new disease strains, pests), which affect the vitality and productivity of plants. Unlike animals, plants are at a disadvantage as they cannot hide from these influences and must face them directly. Farmers attempt to protect agricultural crops from biotic factors with chemical plant protection products. However, with the current emphasis on making agriculture more environmentally friendly, ways are being sought to reduce chemical inputs while maintaining crop yields. The application of endophytic microorganisms could be one way to help plants cope with these negative influences of the environment. This paper describes some types of endophytes and, based on existing research, summarizes their effects on plants that are practically applicable in agriculture.

Key Words: endophytes, biostimulants, fungi, bacteria, viruses

Úvod

V životním prostředí se vyskytuje velké množství mikroorganismů, které jsou značně rozšířené a mají schopnost vytvářet významné interakce s rostlinami. Tyto mikroorganismy můžeme rozlišit na základě místa jejich interakce (obr. 1) na: fylosférické (mikroorganismy kolonizující nadzemní rostlinná pletiva) a rhizosférické (kolonizující podzemní pletiva rostlin). Mikrobiální druhy, které se vyskytují na povrchu rostliny, jsou epifyty a druhy, které se vyskytují uvnitř rostlinných tkání, jsou označovány jako endofyty.

Endofyty byly izolovány z různých rostlinných druhů a vyskytují se v mezibuněčných prostorech různých pletiv, aniž by způsobovaly poškození hostitelských rostlin (Kandel et al., 2017). Díky této své lokalizaci jsou chráněny před stresovými faktory vnějšího prostředí, jsou vystaveny menší konkurenci od jiných mikroorganismů a mají lepší přístup k živinám. Rostlině pak poskytují benefity např. ve formě svých metabolitů, které jí pomáhají v růstu, nebo ve formě stimulace obranných mechanismů rostliny, které jí pomáhají lépe se vyrovnat se stresovými podmínkami (obr. 2).

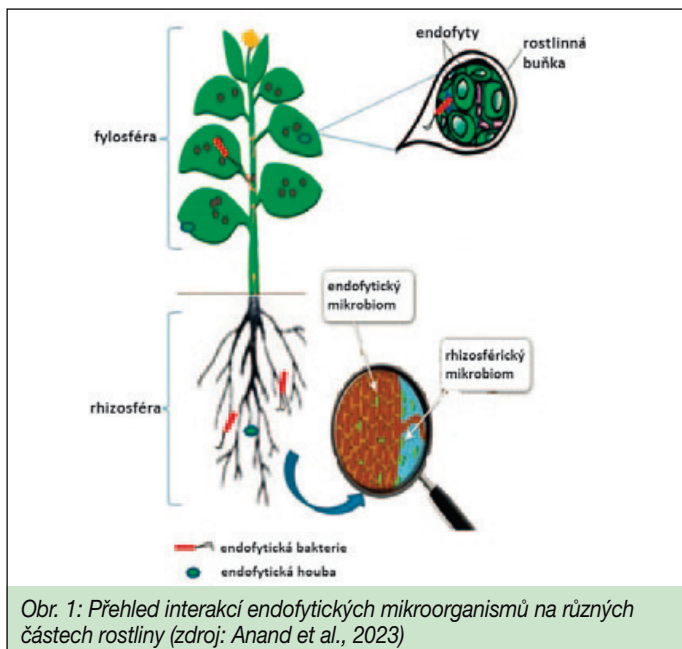
V současné době se těmto mikroorganismům věnuje obrovská pozornost, protože jsou potenciálními producenty různých sekundárních metabolitů s možným využitím nejen v zemědělství, ale i v lékařství či farmaceutickém průmyslu. Vzhledem ke změně klimatu, která představuje velkou hrozbu pro globální potravinnou bezpečnost, je pochopení endofytických interakcí v rostlinách zásadní pro jejich možné další využití. Změna klimatu se projevuje především jako celosvětový nárůst teploty, prodlužující se období sucha, rychlé změny meteorologických podmínek, intenzity srážek a jejich nerovnoměrné rozložení (Easterling et al., 2000). Všechny tyto odchylky posouvají fenologické fáze rostlin, způsobují snižování výnosů plodin a zvyšují šíření nových i běžných patogenů a škůdců. Cílená podpora interakcí mezi endofytickými organismy a rostlinami by mohla pomoci zemědělským plodinám lépe odolávat abiotickým a biotickým stresovým faktorům, což by mohlo vést ke stabilizaci produkce i v měnících se klimatických podmínkách.

Zemědělské systémy přispívají ke změně klimatu stejně jako jiné lidské činnosti vyžadující energetické vstupy. V publikaci Lynch et al. (2021) autoři uvádějí, že zemědělské činnosti odpovídají za zhruba polovinu až tři čtvrtiny všech antropogenních emisí metanu a oxidu dusného. Metan je uvolňován hlavně prostřednictvím živočišné produkce a pěstováním rýže (Saunio et al., 2020). Oxid dusný pak především používáním dusíkatých hnojiv. Výzkumy také ukázaly, že nepřetržité používání hnojiv a pesticidů získaných chemickou syntézou snižuje biologickou rozmanitost půdy a poškozuje přirozené predátory hmyzu (McLaughlin and Mineau, 1995; Alavaisha et al., 2019). Z tohoto pohledu by aplikace endofytických organismů produkujících metabolity, které inhibují šíření a rozvoj rostlinných patogenů, mohla pomoci snížit aplikaci chemických látek na ochranu rostlin. Zajímavé je rovněž zjištění, že domestikace rostlin a v poslední době vývoj vysokoprodukčních odrůd obecně způsobily snížení schopnosti rostlin využívat symbiotických vztahů s užitečnými mikroorganismy (Porter a Sachs, 2020; Valente et al., 2020). Znalosti o endofytických organismech a o jejich interakcích s rostlinami mohou být tedy využity ve vývoji „odrodné nové generace“ tolerantních vůči stresu, ke snížení závislosti na chemických vstupech, ke zlepšení zdraví půdy, k podpoře udržitelnosti zemědělství a k udržení kvality životního prostředí.

Druhy endofytických mikroorganismů

Mezi endofytické mikroorganismy patří bakterie, houby i viry (Stępniewska a Kuźniar, 2013). Endofyty mohou být klasifikovány jako pravé nebo přechodné endofyty v závislosti na jejich životním cyklu a typu vztahu, který vytvářejí s rostlinami. Pravé endofyty se vyvíjejí společně se svými hostiteli, vytvářejí vzájemně prospěšné vztahy a často se šíří v rostlinných pletivech vertikálně. Naproti tomu přechodné endofyty se mohou v závislosti na vnějších podmínkách prostředí chovat jako patogen nebo jako mutualistický symbiont (Wani et al., 2015).

Mezi **bakteriální endofyty** patří různé druhy rodu *Pseudomonas*. Např. bakterie *Pseudomonas fluorescens* zvyšuje odolnost rostlin k síťovité skvrnitosti ječmene (Khan et al., 2010), *Pseudomonas*



Obr. 1: Přehled interakcí endofytických mikroorganismů na různých částech rostliny (zdroj: Anand et al., 2023)

chlororaphis pak k pruhoovitosti ječmene a sněti kryté ječně (Johnsson et al., 1998). Mezi další hojně se vyskytující bakteriální endofyty patří rody *Bacillus* a *Rhizobium*. Některé druhy rodu *Bacillus* působí také např. proti houbám rodu *Fusarium*, které napadají klasy obilovin a produkují pro člověka nebezpečné mykotoxiny.

Houbové endofyty zahrnují široké spektrum hub napříč všemi fylogenetickými kategoriemi. Jak je vidět na obr. 3, diverzita houbových endofytů je obrovská. Jejich společnou vlastností je schopnost asymptomatické (bezpříznakové) kolonizace rostlinných pletiv. Mezi houbové endofyty lze také zařadit speciální interakce rostlin a hub zvané „mykorhizní symbiózy“, při kterých kromě biochemických změn dochází i k morfologickým modifikacím hostitelské rostliny. V rámci mykorhizních symbióz rozlišujeme dva základní typy: ektomykorhizní a endomykorhizní. Hyfy ektomykorhizních hub rostou částečně uvnitř kořenového mezibuněčného prostoru a částečně na povrchu kořenů a v půdě. Tyto houby žijí v symbióze se svými hostiteli a podílí se na přenosu přístupných forem živin přímo do kořenů rostlin. Endomykorhizní endofyty žijí uvnitř rostlinných buněk a jsou reprezentovány především arbuskulární mykorhizou, která představuje nejrozšířenější typ mykorhizní symbiózy, jejíž výskyt je předpokládán u 70-90 % rostlin (Prasad, 2020). Ovšem navázání úspěšné interakce závisí na mnoha faktorech, jako je kombinace genotypů rostliny a houby, vlastnosti půdy (pH, struktura, vlhkost), rychlost kolonizace a další (Sena et al., 2024). Při studiu houbového endofytu *Microdochium bolleyi* bylo zjištěno, že kolonizace rostlin pšenice endofytem začíná již od naklíčeného semene a následně se postupně šíří kořenovým systémem, prostupuje stéblem a vytváří chlamyospory pro přenos do další vegetační sezóny, avšak ani 90 dní po setí nedosáhla kolonizace až k čepelím listů (Matušinsky et al., 2024). Nicméně postup kolonizace napříč rostlinou se u jednotlivých endofytů liší. V některých případech, např. *Epichloë festucae*, se může endofyt šířit také kolonizací semen a jejich prostřednictvím pak přecházet i do další generace rostlin (von Cräutlein et al., 2021). Navíc různé zemědělské plodiny, ale i jednotlivé odrůdy jedné plodiny mohou na konkrétní endofytický organismus reagovat odlišně, a to např. z hlediska růstu rostlin a tvorby výnosu, jak bylo zjištěno u kukuřice (Ramírez-Flores et al., 2019) nebo z hlediska odolnosti vůči stresu u pšenice (Lehnert

et al., 2018). Na obr. 4 je zachycen houbový endofyt v kořenech pšenice ozimé.

Viry, speciálně baculoviry, byly známy jako alternativa k syntetickým insekticidům již v roce 1977 (Arif, 1977). Kolektiv autorů Galli et al. (2024) uvádí, že dnes jsou právě baculoviry používány k biologické ochraně proti motýlům, blanokřídlému (vosy) a dvoukřídlému (mouchy) hmyzu. Baculoviry jsou v rámci EU v současné době klasifikovány jako látky s nízkým rizikem pro člověka, zvířata a životní prostředí, pokud nejsou prokázány jejich negativní účinky na necílové organismy (Galli et al., 2024). Vybrané druhy virů se také používají k vysoce selektivní ochraně jablek před obalečem jablečným, nebo k ochraně rajčat před makadlovkou (Gonthier et al., 2023).

Účinky endofytů využitelné v zemědělství

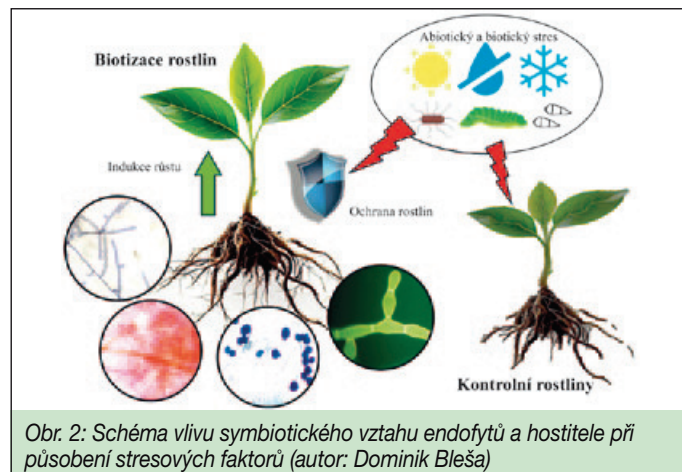
Endofyty jsou někdy označovány jako mikrobiální rostlinné biostimulanty. Obecně se rostlinným stimulantem rozumí jakákoli látka nebo mikroorganismus aplikovaný na rostliny s cílem zvýšit výživovou účinnost, odolnost vůči abiotickému stresu a zlepšit kvalitativní vlastnosti plodin (Galli et al., 2024). V oblasti zemědělství dochází k významným interakcím mezi rostlinou a endofytem, které pozitivně ovlivňují vitalitu, růst a odolnost rostlin vůči různým druhům biotických a abiotických stresů. Hostitelskou rostlinu endofyty ovlivňují prostřednictvím různých mechanismů, které mohou být klasifikovány jako přímé a nepřímé (Asad et al., 2023). Přímý mechanismus zahrnuje rozpustnost živin, fixaci dusíku a produkci růstových

regulátorů. Nepřímé mechanismy zahrnují indukovanou systémovou rezistenci vzniklou aktivací obranné reakce v rostlinách, potlačení patogenů produkcí antimikrobiálních sloučenin a zlepšenou odolnost vůči stresu (Kaur et al., 2024).

Účinnost biostimulantů může být ovlivněna různými faktory jako je typ biostimulantu, cílový druh plodiny, podmínky životního prostředí a použitá metoda aplikace. Proto je další výzkum v této oblasti žádoucí a v souvislosti s aktuálním tlakem na snížení objemu přípravků na ochranu rostlin by měly být biostimulanty, včetně endofytických mikroorganismů, zařazeny mezi strategie v rámci integrované ochrany rostlin. V České republice je problematika endofytických mikroorganismů mimo jiné řešena v rámci výzkumného projektu Ministerstva zemědělství České republiky s názvem „Endofytické mikroorganismy pro ekologizaci moderního zemědělství (č. projektu QL24010008).

Ovlivnění růstu rostlin

Na růst a vývoj rostlin mají významný vliv půdní mikroorganismy obývající rhizosféru. Rhizosféra je oblast půdy, která obklopuje kořeny rostlin, a ve které dochází ke komplexním interakcím mezi



Obr. 2: Schéma vlivu symbiotického vztahu endofytů a hostitele při působení stresových faktorů (autor: Dominik Bleša)

rostlinnými kořeny, půdou a mikroorganismy. Kolonizace endofytem pomáhá hostitelským rostlinám při vstřebávání a využití živin a zlepšuje také jejich celkovou dostupnost. V posledních letech byly objeveny mnohé endofytické mikroorganismy (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Serendipita*, *Curvularia*), které pomáhají hostitelským rostlinám zvýšit příjem fosforečnanů, a to např. díky vyšší efektivitě přenašečů, mineralizací organických molekul



Obr. 3: Diverzita houbových endofytů izolovaných z kořene ozimé pšenice (autor: Dominik Bleša)

v půdě a solubilizací nerozpustných živin (Devi et al., 2023). Navíc některé endofytické houby produkují rostlinné hormony, včetně auxinu, kyseliny abscisové a gibberelinů, které regulují růst rostlin a kořenů (Aleahmad & Ebrahimi, 2023).

Podpora rostlin v průběhu abiotického stresu

Rostliny jsou neustále vystaveny nějaké formě environmentálního stresu, kam patří i abiotický stres, tedy faktory jako vysoká a nízká teplota, sucho, zasolení půdy, teplotní výkyvy, expozice těžkým kovům, nedostatek živin nebo oxidační stres. Změna klimatu přispívá k častějšímu výskytu těchto stresorů, které na rostliny často působí společně. Přítomnost endofytů v rostlině má za následek minimálně dva efekty podílející se na odolnosti rostlin vůči abiotickému stresu (Bueno & Lopes, 2020). Prvním je stimulace stresové odpovědných mechanismů rostliny okamžitě po detekci stresu, což pomáhá rostlinám předcházet nebo zmírňovat účinky stresu. Druhým efektem je, že endofyty produkují metabolity, které pomáhají rostlinám lépe odolávat stresu. Endofyty produkují např. fytohormony a antioxidanty, které brání nadbytečnému příjmu solí z půdy do rostliny a stabilizují homeostázi iontů (Baltruschat et al., 2008; Lubna et al., 2022). To vede ke zvýšení množství a délky kořenů, ke zvýšení intenzity fotosyntézy a vyššímu obsahu chlorofylu, dále také k produkci organických kyselin, akumulaci osmolytů apod. Následně dochází ke zvýšení množství biomasy nadzemních částí v porovnání s rostlinami bez endofytických mikroorganismů (Zhou et al., 2021). Výzkum kolektivu autorů Macabuhay et al. (2022) prokázal, že inokulace rostlin huseničku rolního (*Arabidopsis thaliana*) endofytem *Paraburkholderia phytofirmans* podporoval růst rostlin zvýšením vývoje kořenového systému i za vysokých teplotních podmínek, což umožnilo rostlinám přístup k většímu objemu půdy, a tím lépe zvládat abiotické strese jako teplo a sucho. Endofyty také umožňují rostlinám růst na půdách znečištěných přítomností těžkých kovů. V první řadě zabraňují příjmu těžkých kovů samotnými rostlinami. Endofytická houba *Mucor sp.* odstraňuje z půdy těžké kovy tím, že je ukládá do svých hyf (Zahoor et al., 2017). Tím zabraňuje příjmu těchto kovů hostitelskými rostlinami a má tedy potenciální využití ve fytoremediaci. Jedinečnost endofytických mikroorganismů tkví také v jejich schopnosti ovlivňovat více než jednu vlastnost hostitelských rostlin. Jedním z příkladů je houba *Serendipita indica*, která ovlivňuje toleranci rostlin vůči zasolení půdy, suchu, vysokým teplotám, chladu a těžkým kovům (Baltruschat et al., 2008; Sun et al., 2010; Mohd et al., 2017). Tuto endofytickou houbu izoloval tým autorů Verma et al. (1998) z kořenů xerotolerantních rostlin rostoucích v Tháské poušti v Indii.

Podpora rostlin v ochraně proti biotickým vlivům

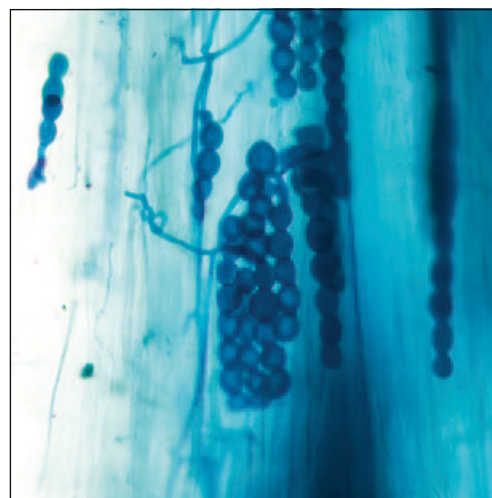
Biotický stres nastává ve chvíli, kdy je rostlina poškozována fytopatogeny (houby, bakterie, viry), hmyzem, ale také herbivory. Doposud standardním postupem v ochraně proti rostlinným patogenům je použití chemikálií. Nicméně ty jsou ve většině případů zdraví škodlivé, mohou narušovat ekosystémy a stále častěji se potýkáme s problémem vzniku rezistencí fytopatogenů proti nim. Poznatky získané studiem endofytických interakcí mohou přispět k rozvoji biologických metod redukce výskytu biotických stresových faktorů, což snižuje závislost na chemických vstupech. Biologická ochrana zahrnuje použití buď užitečných organismů nebo látek, které tyto organismy produkují, jako jsou enzymy, fytohormony a sekundární metabolity, pro zmírnění negativních účinků způsobených patogeny a pro stimulaci příznivé reakce v rostlině (Narayanan et al., 2022).

Metabolity produkované houbou *Trichoderma harzianum* prokázaly silnou antibakteriální aktivitu vůči hnědé hnilobě bramboru způsobované bakterií *Ralstonia solanacearum* (Yan and Khan, 2021). Endofytické aktinomycety *Streptomyces spp.* působí jednak proti bakteriálním patogenům, které způsobují macerace pletiv u brambor (Padilla-Gálvez et al., 2021), nebo proti fuzariózám klasu u pšenice tím, že blokuje šíření patogenu v místě infekce (Colombo et al., 2019). Dále např. bakterie *Micromonospora* prokázala účinky proti plísní šedé u rajčat, způsobené houbovým patogenem *Botrytis cinerea* (Martí nez-Hidalgo et al., 2015).

Pomoc endofytických organismů při ochraně rostlin před hmyzem a herbivory spočívá především v tvorbě alkaloidů, které mají účinky jak na hmyz, tak na živočichy. Např. houba *Neothypodium gansuense* produkuje alkaloidy, které zvyšují úmrtnost mšic a způsobují intoxikózu zvířat, která spásají trávy s přítomným endofytem (Zhang et al., 2011). Endofyt *Epichloë* produkuje alkaloid peramin, který působí proti různým druhům hmyzu. Díky tomu, že je rozpustný ve vodě, je rozptýlen v celé rostlině (Panaccione et al., 2014). Bakterie *Bacillus thuringiensis* se často používá na zemědělských plochách i ve sklenicích pro ochranu rostlin před larvami motýlů v rámci speciálního systému ochrany, kdy je hmyz přitahován atraktivní látkou. Po pozření toxinu, který *B. thuringiensis* vytváří, dochází k jeho úhynu (Galli et al., 2024).

Účinky a využití endofytů v jiných odvětvích

Endofytické účinky mikroorganismů a znalost jejich interakcí mají interdisciplinární význam. Kromě zemědělství mohou být využity v biotechnologiích, bioenergetice, fytoremediaci, lékařství nebo farmaceutickém průmyslu (Kaur et al., 2024). Endofyty z léčivých rostlin mohou napodobovat bioaktivní látku produkovanou hostitelskou rostlinou nebo mohou hrát důležitou roli při produkci této sloučeniny (Srivastava et al., 2024).



Obr. 4: Endofyt rodu *Tulasnella* tvořící chlamydospory v kořenech ozimé pšenice (úsečka představuje 50 μm, autor: Dominik Bleša)

V souvislosti se stále rostoucí rezistencí patogenů k antibiotikům představují infekční onemocnění významný celosvětový problém. V tomto ohledu se sekundární metabolity odvozené z endofytických mikroorganismů jeví jako slibné zdroje pro nalezení nových antimikrobiálních látek. Ve studii kolektivu autorů Srivastava et al. (2024) inhibovaly některé endofytické bakterie, izolované z česneku (*Allium sativum* L.), jeden nebo více lidských patogenů, jako *Escherichia coli* (způsobuje průjemy), *Enterococcus faecalis* (způsobuje záněty močových cest, gynekologické záněty), *Bacillus cereus* (způsobuje lokální i systémové infekce), *Staphylococcus aureus* (zlatý stafylokok, způsobuje různé druhy infekcí), *Pseudomonas aeruginosa* (zánět močových cest či středního ucha), *Enterobacter* (pneumonie, močové infekce), *Salmonella typhi* (břišní tyfus). Kolektiv autorů Peng et al. (2019) zjistil, že sloučeniny produkované endofytickou houbou *Chaetomium* sp. prokázaly silnou aktivitu proti *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecium* (enterokoky způsobující záněty močových cest, nitrobršni i gynekologické záněty).

Závěr

Endofytické organismy a jejich působení v rostlinách je stále málo prozkoumanou oblastí, která si zaslouží pozornost výzkumu, protože by mohla být jednou z cest, jak snížit spotřebu chemických přípravků na ochranu rostlin a přitom pomoci zemědělským plodinám čelit nehostinnému okolnímu prostředí a napadení patogeny. Dosavadní výzkum dokládá význam kolonizace endofytickými mikroorganismy v ochraně rostlin proti biotickým a abiotickým stresům. Nicméně konkrétní mechanismy interakce mezi endofyty a rostlinnými buňkami, které nakonec vedou k vyšší odolnosti rostlin, jsou stále málo prozkoumané. Tato interakce také ovlivňuje, zda hostitelská rostlina vnímá daný mikroorganismus jako patogen či „přítele“. Musí být také prozkoumáno, zda prospěšný vztah konkrétního endofytu bude moci být navázán jen s konkrétní zemědělskou plodinou, nebo bude moc kolonizovat široké spektrum plodin, popř. do jaké míry bude ovlivňovat výnos plodin při jeho velkoplošném použití.

/Recenzováno/

Poděkování

Výsledek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství ČR – výzkumný projekt č. QL24010008.

Kontakt

zavrelova@vukrom.cz

Literatura

- Alavaisha, E., Manzoni, S., Lindborg, R. (2019). Different agricultural practices affect soil carbon, nitrogen and phosphorous in Kilombero – Tanzania. *J. Environ. Manage.*, 234, 159–166.
- Aleahmad, P., Ebrahimi, L. (2023). The possible Application of Endophytic Fungi. *Res. J. Pharmacogn.*, 10(4), 81–94.
- Arif, B.M. (1977). Baculoviruses for Insect Pest Control: Safety Considerations. *Bull. Entomol. Soc. Am.*, 23(2), 148–149.
- Asad, S., Priyashantha, A.K.H., Tibpromma, S., Luo, Y., Zhang, J., Fan, Z., Zhao, L., Shen, K., Niu, C., Lu, L. (2023). Coffee-Associated Endophytes: Plant Growth Promotion and Crop Protection. *Biology*, 12(7), 911.
- Baltruschat, H., Fodor, J., Harrach, B.D., Niemczyk, E., Barna, B., Gullner, G., Janeczko, A., Kogel, K.H., Schäfer, P., Schwarczinger, I., et al. (2008). Salt tolerance of barley induced by the root endophyte *Piriformospora indica* is associated with a strong increase in antioxidants. *New Phytol.*, 180(2), 501–510.
- Bueno, P.C.P., Lopes, N.P. (2020). Metabolomics to Characterize Adaptive and Signaling Responses in Legume Crops under Abiotic Stresses. *ACS Omega*, 5(4), 1752–1763.
- Colombo, E.M., Kunova, A., Pizzatti, C., Saracchi, M., Cortesi, P., Pasquali, M. (2019). Selection of an Endophytic *Streptomyces* sp. Strain DEF09 From Wheat Roots as a Biocontrol Agent Against *Fusarium graminearum*. *Front. Microbiol.*, 10, 2356.
- Devi, R., Verma, R., Dhalaria, R., Kumar, A., Kumar, D., Puri, S., Thakur, M., Chauhan, S., Chauhan, P.P., Nepovimova, E., et al. (2023). A systematic review on endophytic fungi and its role in the commercial applications. *Planta*, 257(4), 70.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487), 2068–2074.
- Khan, M.R., Brien, E.O., Carney, B.F., Doohan, F.M. (2010). A fluorescent pseudomonad shows potential for the control of net blotch disease of barley. *Biol Control.*, 54(1), 41–45.
- Lehnert, H., Serfling, A., Friedt, W., Ordon, F. (2018). Genome-Wide Association Studies Reveal Genomic Regions Associated With the Response of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Mycorrhizae Under Drought Stress Conditions. *Front. Plant Sci.*, 9, 1728.
- Lubna, Khan, M.A., Asaf, S., Jan, R., Waqas, M., Kim, K.M., Lee, I.J. (2022). Endophytic fungus *Bipolaris* sp. CSL-1 induces salt tolerance in Glycine max. L via modulating its endogenous hormones, antioxidative system and gene expression. *J. Plant Interact.*, 17(1), 319–332.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., Pierrehumbert, R. (2021). Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO2-Emitting Sectors. *Front. Sustain. Food Syst.*, 4, 518039.
- Macabuhay, A., Arsova, B., Watt, M., Nagel, K.A., Lenz, H., Putz, A., Adels, S., Müller-Linow M., Kelm, J., Johnson, A.A.T., et al. (2022). Plant Growth Promotion and Heat Stress Amelioration in Arabidopsis Inoculated with *Paraburkholderia phytofirmans* PsJN Rhizobacteria Quantified with the GrowScreen–Agar II Phenotyping Platform. *Plants*, 11(21), 2927.
- Martinez-Hidalgo, P., Garcia, J.M., Pozo, M.J. (2015). Induced systemic resistance against *Botrytis cinerea* by *Micromonospora* strains isolated from root nodules. *Front. Microbiol.*, 6, 922.
- Matušinsky, P., Florová, V., Sedláková, B., Mlčoch, P., Bleša, D. (2024). Colonization dynamic and distribution of the endophytic fungus *Microdochium bolleyi* in plants measured by qPCR. *PLoS ONE*, 19(1), e0297633.
- McLaughlin, A., Mineau, P. (1995). The impact of agricultural practices on biodiversity. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 55(3), 201–212.
- Mohd, S., Shukla, J., Kushwaha, A.S., Mandrah, K., Shankar, J., Arjaria, N., Saxena, P.N., Narayan, R., Roy, S.K., Kumar, M. (2017). Endophytic Fungi *Piriformospora indica* Mediated Protection of Host from Arsenic Toxicity. *Front. Microbiol.*, 8, 754.
- Narayanan, M.M., Ahmad, N., Shivanand, P., Metali, F. (2022). The Role of Endophytes in Combating Fungal- and Bacterial-Induced Stress in Plants. *Molecules*, 27(149), 6549.
- Padilla-Gálvez, N., Luengo-Urbe, P., Mancilla, S., Maurin, A., Torres, C., Ruiz, P., France, A., Acuna, I., Urrutia, H. (2021). Antagonistic activity of endophytic actinobacteria from native potatoes (*Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum* L.) against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and *Pectobacterium atrosepticum*. *BMC Microbiol.* 21, 335.
- Panaccione, D.G., Beaulieu, W.T., Cook, D. (2014). Bioactive alkaloids in vertically transmitted fungal endophytes. *Funct. Ecol.*, 28, 299–314.

- Peng, F., Hou, S.Y., Zhang, T.Y., Wu, Y.Y., Zhang, M.Y., Yan, X.M., Xia, M.Y., Zhang, Y.Z. (2019). Cytotoxic and antimicrobial indole alkaloids from an endophytic fungus *Chaetomium* sp. SYP-F7950 of *Panax notoginseng*. *RSC Adv.*, 9(49), 28754–28763.
- Porter, S.S., Sachs, J.L. (2020). Agriculture and the Disruption of Plant-Microbial Symbiosis. *Trends Ecol. Evol.*, 35(5), 426–439.
- Prasad, K. (2020). Positive Importance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Global Sustainable Agriculture and Environment Management for Green Technology. *Current Investig. Agric. Current Res.*, 9(2), 1182–1184.
- Ramírez-Flores, M.R., Bello-Bello, E., Rellán-Álvarez, R., Sawers, R.J.H., Olalde-Portugal, V. (2019). Inoculation with the mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* modulates the relationship between root growth and nutrient content in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.). *Plant Direct*, 3(12), e00192.
- Saunio, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond P.A.R., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., et al. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12(3), 1561–1623.
- Sena, L., Mica, E., Valè, G., Vaccino, P., Pecchioni, N. (2024). Exploring the potential of endophyte-plant interactions for improving crop sustainable yields in a changing climate. *Front. Plant Sci.*, 15, 1349401.
- Srivastava, P., Tiwari, S.P., Srivastava, A.K., Sharma, R. (2024). Optimization of Sterilization Parameters for Isolation of Endophytes from *Allium sativum* and Exploring its Antibacterial Activity. *J. Pure Appl. Microbiol.*, 18(2), 961–979.
- Stępniewska, Z., Kuźniar, A. (2013). Endophytic microorganisms – promising applications in bioremediation of greenhouse gases. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97(22), 9589–9596.
- Sun, C., Johnson, J.M., Cai, D., Sherameti, I., Oelmüller, R., Lou, B. (2010). *Piriformospora indica* confers drought tolerance in Chinese cabbage leaves by stimulating antioxidant enzymes, the expression of drought-related genes and the plastid-localized CAS protein. *J. Plant Physiol.*, 167(12), 1009–1017.
- Valente, J., Gerin, F., Le Gouis, J., Moëgne-Loccoz, Y., Prigent-Combaret, C. (2020). Ancient wheat varieties have a higher ability to interact with plant growthpromoting rhizobacteria. *Plant Cell Environ.*, 43(1), 246–260.
- Verma, S., Varma, A., Rexer, K.H., Hassel, A., Kost, G., Sarbhoy, A., Bisen, P., Bütehorn, B., Franken, P. (1998). *Piriformospora indica*, gen. et sp. nov., a new root-colonizing fungus. *Mycologia*, 90(5), 895–903.
- von Cräutlein, M., Helander, M., Korpelainen, H., Leinone, P.H., de Aldana, B.R.V., Young, C.A. (2021). Genetic Diversity of the Symbiotic Fungus *Epichloë festucae* in Naturally Occurring Host Grass Populations. *Front. Microbiol.*, 12, 756991.
- Wani, Z.A., Ashraf, N., Mohiuddin, T., Riyaz-UI-Hassan, S. (2015). Plant endophyte symbiosis, an ecological perspective. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 99(7), 2955–2965.
- Yan, L., Khan, R.A.A. (2021). Biological control of bacterial wilt in tomato through the metabolites produced by the biocontrol fungus, *Trichoderma harzianum*. *Egypt. J. Biol. Pest Control*, 31, 5.
- Zahoor, M., Irshad, M., Rahman, H. (2017). Alleviation of heavy metal toxicity and phytostimulation of *Brassica campestris* L. by endophytic *Mucor* sp. MHR-7. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 142, 139–149.
- Zhang, X.X., Li, C.J., Nan, Z.B., Matthew, C. (2011). *Neotyphodium* endophyte increases *Achnatherum inebrians* (drunken horse grass) resistance to herbivores and seed predators. *Weed Res.*, 52(1), 70–78.
- Zhou, X.R., Dai, L., Xu, G.F., Wang, H.S. (2021). A strain of *Phoma* species improves drought tolerance of *Pinus tabulaeformis*. *Sci. Rep.*, 11, 7637.

Nové poznatky týkající se rezistence pšenice k viru zakrslosti pšenice (WDV) (Novel findings in the study of wheat resistance to wheat dwarf virus (WDV))

Kosová Klára^{1*}, Vítámvás Pavel¹, Holková Ludmila², Smutná Pavlína²

¹Odbor genetiky a šlechtění rostlin, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6-Ruzyně;

²Agronomická fakulta, Mendelova univerzita, Brno

Souhrn: Virus zakrslosti pšenice (WDV) je původcem závažného virového onemocnění pšenice, ale i ječmene a dalších obilnin vedoucí k diskoloraci listů, zakrslosti rostlin a významnému snížení výnosu. Virus je přenášen křískem polním a vyskytuje se převážně v sušších a teplejších oblastech ČR. Hodnocení rezistence je klasicky prováděno na základě hodnocení vizuálních symptomů (diskolorace listů, výška rostlin) a stanovením titru viru pomocí ELISA anebo qPCR. Byly identifikovány odrůdy pšenice se zvýšenou rezistencí k WDV (př. Mv Dalma, Mv Vekni), avšak dosud nebyly identifikovány geny podmiňující rezistenci k WDV. Nové metody genetického mapování GWAS zahrnující široký rozsah genotypů a využívající znalost kompletní sekvence genomu pšenice vedly k publikování QTL, resp. kandidátních genů vhodných pro šlechtění na zvýšenou rezistenci k WDV s využitím tzv. markerově-asistované selekce (MAS).

Klíčová slova: WDV; rezistence; fenotypování; GWAS; QTL pro rezistenci

Abstract: Wheat dwarf virus (WDV) causes disease of wheat, barley and other cereals leading to reduced growth, leaf discoloration, and yield reduction. WDV is transmitted by leafhoppers and occurs predominantly in relatively warm and dry regions of Czechia. Resistance of infected wheat plants is evaluated by phenotyping visual symptoms including plant height and leaf discoloration and virus titre determination with ELISA and qPCR. Although some cultivars (Mv Dalma, Mv Vekni) reveal partial resistance to WDV infection no resistance genes were identified until now. However, employing new methods of genetic mapping such as genome-wide association studies (GWAS) together with publication of complete annotated wheat genome sequence led to an identification of promising QTLs and candidate genes, respectively, suitable for breeding new materials with enhanced WDV resistance utilizing marker-assisted selection (MAS).

Key Words: WDV; resistance; phenotyping; GWAS; resistance QTL