

Toxiny sinic — zbraň proti konkurenci?

Pavel Babica, Blahoslav Maršálek, L. Bláha, M. Drábková

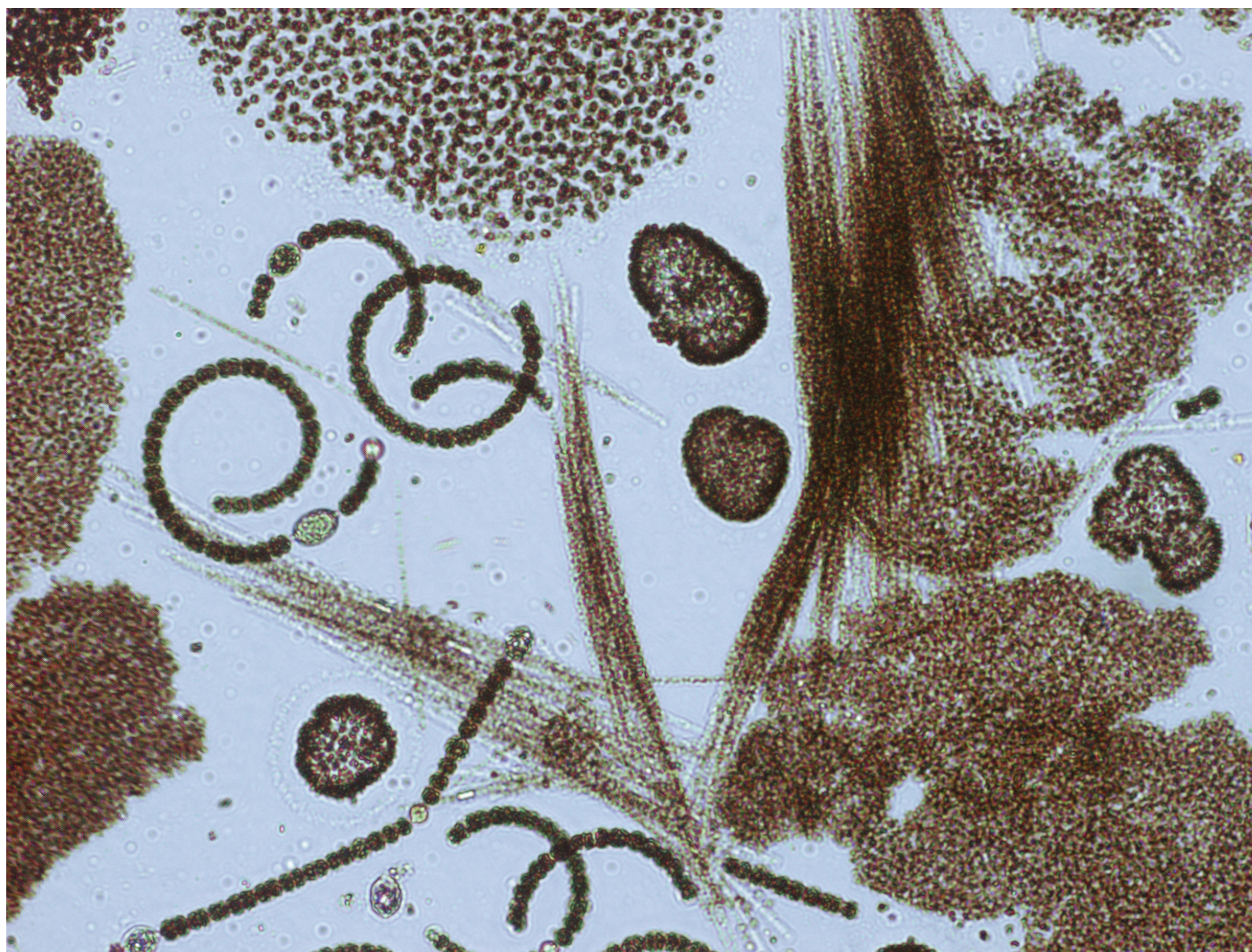
Sinice neboli cyanobakterie představují velmi starobyklou skupinu prokaryotických organismů. Jde o gramnegativní eubakterie schopné fotosyntézy za současné produkce kyslíku (tzv. oxygenní fotosyntéza) žijící ve formě jednotlivých buněk, kulovitých kolonií nebo vláken. Sinice osidlují po celém světě nejrozmanitější biotopy a jsou přirozenou součástí planktonních i bentických společenstev téměř všech vodních ekosystémů. V důsledku antropogenní eutrofizace vod se v posledních desetiletích výrazně zvýšila nabídka živin v prostředí (zejména fosforu a dusíku), na kterou sinice reagují velmi intenzivním růstem a tvorbou nové biomasy. V mnoha vnitrozemských vodních nádržích, pomalu tekoucích řekách i mělkých příbřežních mořích se tak stal hromadný rozvoj sinic zcela běžným jevem. Zároveň však jevem krajně nežádoucím, neboť sinice mohou produkovat do okolí nejen sloučeniny negativně ovlivňující chuť a pach vody, ale také celou

řadu látek biologicky aktivních či toxic-
kých (cyanotoxinů), které vážně komplikují využívání vody pro rekreační nebo vodárenské účely. Výsledky výzkumů ukázaly, že cyanotoxiny mohou skutečně poškozovat zdraví člověka (akutní i chronické účinky na nejrůznější orgány, na imunitní systém, embryonální vývoj, karcinogenezi) a za určitých okolností představuje jejich přítomnost ve vodách reálné riziko (viz Živa 2002, 3: 112–113; 5: 198–2000).

Navzdory intenzivnímu studiu však zůstává se sinicemi a cyanotoxiny spojeno mnoho otázníků. Dosud nebyla uspokojivě zodpovězena ani otázka nejzákladnější: proč vlastně sinice cyanotoxiny produkují? Jaká je přirozená ekologická či fyziologická funkce těchto sloučenin? Vzhledem k tomu, že cyanotoxiny jsou velmi různorodou skupinou látek, jediná univerzální odpověď pravděpodobně neexistuje. Avšak i v případě, že se zaměříme na konkrétní typ cyanotoxinů nebo dokonce konkrétní slouče-

ninu, nabízí se zpravidla hned několik možných vysvětlení, každé z nich pochopitelně podpořené množstvím důkazního materiálu. Nejčastěji diskutované hypotézy připisují cyanotoxinům strukturální funkci, účast v metabolických procesech (zásobní látky bohaté na dusík?), roli v příjmu a uskladnění živin (chelatace železa?), funkci obranných molekul proti predátorům (především zooplanktonu) nebo úlohu signálních molekul při chemické komunikaci mezi organismy (ať už v rámci jednoho druhu či mezidruhové — s jinými druhy sinic či s bakteriemi?). Jiná teorie předpokládá, že by některé cyanotoxiny mohly být produkovány přímo za účelem potlačení rozvoje konkurujících fotosyntetizujících autotrofních organismů. Není totiž zcela jasné, proč v eutrofizovaných vodách dochází tak často k naprosté a dlouhotrvající dominanci sinic (zvláště pak některých planktonních rodů *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktobrix*, *Cylindrospermopsis*) na úkor ostatních vodních fotoautotrofů, tj. vyšší vodní vegetace (makrofyt) a nejrůznějších skupin řas (zelených řas — *Chlorophyta*, rozsivek — *Bacillariophyta*, skrytinek — *Cryptophyta* atd.), jejichž rozvoj by měl být zvýšeným množstvím živin taktéž podporován. Z výsledků reálných pozorování např. na

Sinicový vodní květ v sezoně 2003 v nádrži Rozkoš. Na obr. zleva spirálová vlákna r. Anabaena, kulaté drobné kolonie r. Woronichia, sropečky vláken r. Aphanizomenon a kompaktní kolonie sinice Microcystis ichthyoblabe



Zástupci sinic nejčastěji tvořících vodní květy jsou také významnými producenty mnoha cyanotoxinů. Na horním obrázku uprostřed je sinice planktonního r. *Aphanizomenon*, okolo zástupce r. *Anabaena*, dole sinice *Microcystis aeruginosa*. Snímky L. Šejniové

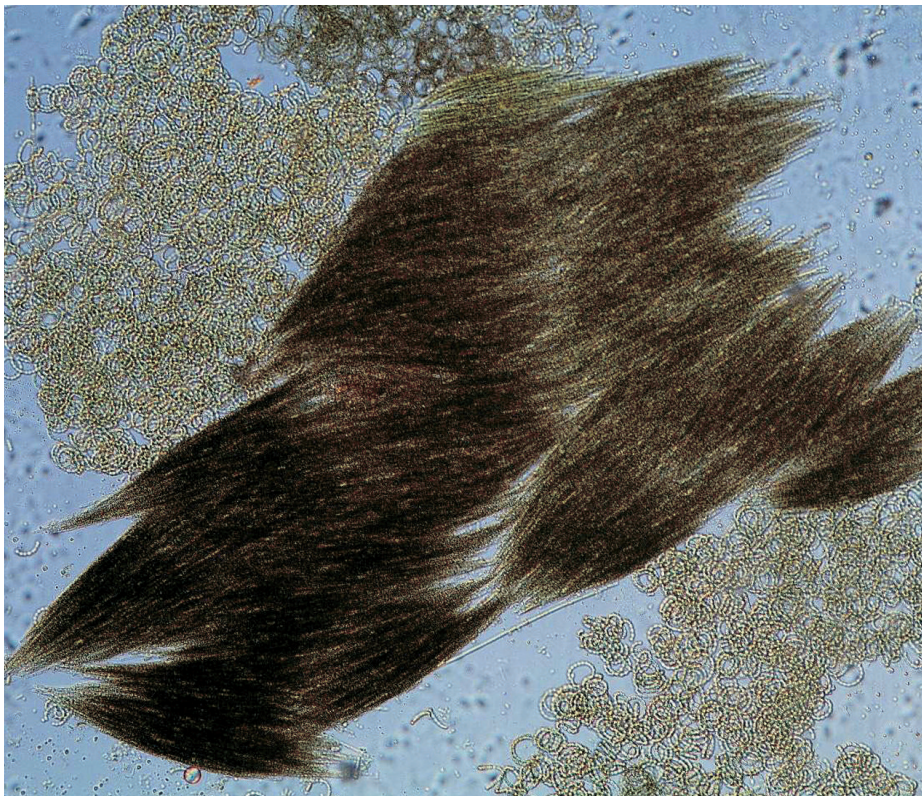
Brněnské přehradě nebo Nových Mlýnech (typické eutrofizované nádrže) je patrná každoroční rychlá sukcese společenstev, jejímž konečným výsledkem je drastické snížení druhové diverzity fytoplanktonu a převládnutí vodního květu sinic r. *Microcystis*. Nelze samozřejmě vyloučit, že se sinice prosazují proti svým konkurentům pouze díky své „lepší životní strategii“ a schopnosti lépe využívat podmínky panující v eutrofizovaných ekosystémech, přičemž jim mohou samozřejmě pomáhat i cyanotoxiny, ať už je jejich funkce jakákoli. Je však také možné, že úkolem některých cyanotoxinů je skutečně cíleně toxicky působit na konkurující fotoautotrofy a poskytnout tímto způsobem sinicím nezanedbatelnou kompetiční výhodu. Podobné působení lze označit jako alelopatické. Podle definice se alelopatií rozumí přímé nebo nepřímé, prospěšné nebo škodlivé působení rostlin, hub, řas, bakterií na jiné rostliny, houby, řasy či bakterie prostřednictvím chemických sloučenin uvolňovaných do prostředí.

Cyanotoxiny jako alelopatické látky?

Alelopatie byla popsána u organismů nejen v terestrických, ale i sladkovodních a mořských ekosystémech. Podíváme se podrobněji na situaci ve sladkých vodách a na možné alelopatické interakce, ve kterých vystupují na jedné straně sinice a jejich metabolity, na druhé ostatní fotoautotrofní organismy (konkrétně jiné sinice a dále eukaryotické fotosyntetizující organismy — řasy a vyšší rostliny; jiným autotrofům z řad bakterií nebude věnována pozornost).

Velké množství potenciálně alelopatických látek bylo izolováno z bentických sinic (tj. přisedle žijících). Jde o sloučeniny produkované sinicemi r. *Fischerella* (fischerellin A, B), druhu *Scytonema bofmanni* (cyanobakterin), *Oscillatoria laetevirens* (dosud nepojmenovaná látka), *Nostoc linkia* (cyanobakterin LU-1, LU-2) a *Nostoc* sp. (nostocyclamid), jejichž účinek spočívá v narušení procesů oxygenní fotosyntézy. Jsou tedy víceméně selektivně toxické pro fotosyntetizující organismy (včetně jiných druhů sinic) a dá se předpokládat, že jejich primární funkcí je právě alelopatické působení. Schopnost inhibovat fotosyntézu a zpomalovat růst řas a sinic byla zaznamenána také u sinice *Trichormus doliolum*, avšak látky způsobující tyto efekty nebyly dosud identifikovány. Další dvě sloučeniny — 12-epi-hapalindol E izonitril (ze sinic r. *Fischerella*, resp. *Hapalosiphon*) a kalotrixin A (ze sinic r. *Calothrix*) jsou schopny narušovat syntézu RNA (inhibiční enzymu RNA polymerázy) v nejrůznějších mikroorganismech (bakteriích, houbách) a velmi pravděpodobně odpovídají také za toxické účinky na řasy.

Projevy alelopatie byly zaznamenány i v případě planktonních sinic (tj. vznášejících se volně ve vodním sloupci), které se velmi často rozvíjejí v eutrofizovaných nádržích. Mastné kyseliny ze sinice *Micro-*



cystis aeruginosa negativně ovlivňovaly růst zelené řasy *Chlorella pyrenoidosa*. Růst řas potlačoval také kasumigamid izolovaný rovněž ze sinice *M. aeruginosa*, ovšem pouze ve velmi vysokých koncentracích. Naproti tomu planktopeptin BL1125 produkovaný sinicí *Planktothrix rubescens* již v poměrně nízkých koncentracích tlumil růst sinice *Microcystis aeruginosa* (kmen nereprodukující microcystiny) a řasy *Scenedesmus quadricauda*, naopak kmen *M. aeruginosa* produkující microcystiny nízké koncentrace výrazně neovlivnily.

Planktonní sinice představují především nejvýznamnější producenty cyanotoxinů, jako jsou microcystiny, anatoxiny, saxito-

xiny a cylindrospermopsiny. Tyto sloučeniny jsou vysoce toxické pro obratlovce a v minulosti byly zkoumány zejména jejich účinky na živočichy, zatímco možnému působení na fotoautotrofní organismy byla věnována podstatně menší pozornost. Z těchto cyanotoxinů jsou v souvislosti s alelopatickými efekty pravděpodobně nejvíce diskutovány microcystiny.

Microcystiny a fotoautotrofní organismy

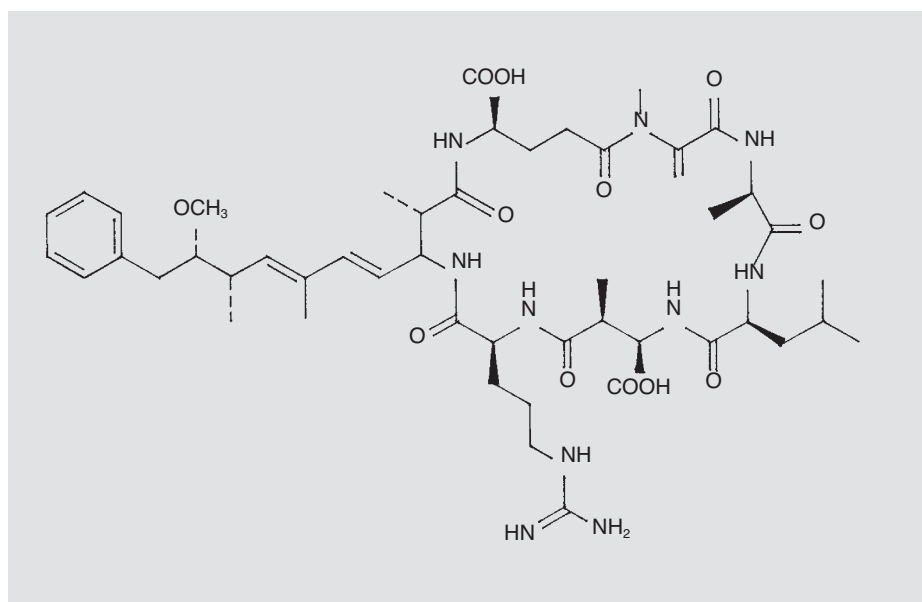
Schopnost microcystinů působit na autotrofní organismy byla nejdříve studována na modelových druzích suchozemských

Tab. Přehled sloučenin sinicového původu (jak jsou v současnosti známy), které vykazují alelopatické účinky na jiné sinice, řasy a vyšší rostliny

Sloučenina	Producent
microcystiny	<i>Microcystis</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Anabaenopsis</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Hapalosiphon</i>
kasumigamid	<i>Microcystis aeruginosa</i>
12-epihapalindol E izonitril	<i>Fischerella</i> , <i>Hapalosiphon</i>
kalotrixin A	<i>Calothrix</i>
cyanobakterin	<i>Scytonema bofmanni</i>
cyanobakterin LU-1, LU-2	<i>Nostoc linckia</i>
fischerellin A, B	<i>Fischerella</i>
nostocyklamid	<i>Nostoc sp.</i>
planktopeptin BL1125	<i>Planktothrix</i> (<i>Oscillatoria</i>) <i>rubescens</i>
mastné kyseliny	<i>Microcystis aeruginosa</i>
nepojmenovaná sloučenina	<i>Oscillatoria laetevirens</i>

rostlin (hořčice bílá — *Sinapis alba*, řeřicha zahradní — *Lepidium sativum*, fazol obecný — *Phaseolus vulgaris*, brambor hlíznatý — *Solanum tuberosum*). Podařilo se prokázat příjem microcystinů rostlinami a byly pozorovány četné negativní účinky (inhibice růstu, vznik chlorózy a nekrózy, inhibice fotosyntézy, změny řady biochemických parametrů ukazujících na stresovou reakci exponovaných rostlin). Tyto výsledky mají velký praktický význam v případech, kdy se voda z nádrží s hromadným rozvojem sinic používá k zavlažování. Z hlediska možného alelopatického působení jsou asi nejzajímavější studie zkoumající vliv microcystinů na vodní fotoautotrofy. Podle publikovaných výsledků laboratorních experimentů jsou microcystiny přijímány makrofyty (měchýřka jávská — *Vesicularia dubyana*, vodní mor kanadský — *Elodea canadensis*, růžkatec ponořený — *Ceratophyllum demersum*, rákos obecný — *Phragmites australis*) a distribuovány v rostlinném těle. Microcystiny způsobovaly u těchto druhů inhibici růstu, inhibici fotosyntézy, změny v poměru chlorofylu a a chlorofylu b (ukazující na stresovou reakci), změny aktivity glutathion S-transferázy (enzym odpovědný za detoxikaci nejen microcystinů) a ovlivnění biochemických parametrů souvisejících s nárůstem koncentrace reaktivních kyslíkových radikálů v buňkách (důsledek tzv. oxidačního stresu, který microcystiny navozují). Microcystiny inhibovaly růst, fotosyntézu, způsobovaly chlorózy a pokles obsahu fotosyntetických barviv také u okřešku menšího (*Lemna minor*), významně potlačovaly růst, snižovaly obsah chlorofylu a vyvolávaly další biochemické změny u závitky *Spirodella oligorrhiza* a rovněž zamezovaly růstu u zákrutichy *Vallisneria spiralis*.

Informací o působení microcystinů na řasy a jiné sinice existuje ve vědecké literatuře překvapivě malé množství. Microcystin byl přijímán buňkami sinic *Nostoc muscorum* a *Anabaena* BT1 a inhiboval fotosyntézu, aktivitu nitrogenázy (tj. enzymu fixujícího dusík), růst a způsoboval lyze buněk, avšak pouze ve velmi vysokých koncentracích. U zelené řasy *Scenedesmus armatus* a sinice *Synechococcus elongatus* bylo po působení microcystinů pozorováno ovlivnění aktivity glutathion S-transferázy a bio-



Strukturní vzorec jednoho ze zástupců cyanotoxinů planktonních sinic — microcystinu LR. Kreslil S. Holčec

chemických parametrů souvisejících s oxidačním stresem. Jiní autoři pozorovali u zelené řasy *Dunaliella tertiolecta* vystavené působení microcystinu inhibici procesu hromadění chlorofylu v prostředí s nízkou světelnou intenzitou. Microcystin měl dále negativní účinek na růst sinice *Chroococcus minutus*, zelených řas *Coelastrum microporum* a *Chlamydomonas reinhardtii*, naopak stimuloval buněčné dělení u sinice *Microcystis aeruginosa* a zelených řas *Monoraphidium contortum* a *Scenedesmus quadricauda*. U skrytény *Cryptomonas erosa* v přítomnosti microcystinu došlo po počáteční stimulaci dělení k inhibici růstu a úbytku biomasy.

Je tedy zřejmé, že microcystiny v řadě případů působí na autotrofní organismy toxicky, a to již v koncentracích, které se mohou běžně vyskytovat i v přírodních podmínkách. Nicméně, citlivost různých druhů organismů na působení microcystinů se mnohdy významně liší a často byly zaznamenány i protichůdné reakce (prakticky žádné nebo až pozitivní účinky microcystinů). Experimenty zaměřené na studium efektů microcystinů na nejrůznější zástupce autotrofních organismů planktonu, které by měly přispět k objasnění možných alelopatických účinků microcystinů, se v současné době realizují na Oddělení experimentální fykologie a ekotoxikologie Botanického ústavu AV ČR.

Chemická válka mezi organismy

Produkce alelopatických sloučenin není ovšem zdaleka jednostrannou záležitostí sinic, neboť řasy a vyšší vodní rostliny jsou pro změnu schopny produkovat látky ovlivňující rozvoj sinic. Negativní účinky na sinice, ale i na některé řasy mají látky produkované růžkatec ponořeným (*Ceratophyllum demersum*), řečankou mořskou (*Naja marina*), stolístkem klasnatým (*Myriophyllum spicatum*) a parožnatkou *Chara aspera*. Zajímavé chemické interakce byly pozorovány mezi některými řasami a sinicemi — např. zelená řasa šroubatka (*Spirogyra*) stimulovala růst i produkci

microcystinů v sinici *Planktothrix agardhii*. Sinice *Anabaena flos-aquae* v přítomnosti zelené řasy *Chlamydomonas reinhardtii* zvyšovala produkci anatoxinu-a (který pro řasu nebyl významně toxický), a naopak snižovala produkci microcystinu (který růst této řasy inhiboval). *Chlamydomonas reinhardtii* také produkovala sloučeniny, které u *Anabaena flos-aquae* potlačovaly tvorbu heterocyst, buněk specializovaných na fixaci dusíku. Sinice *Microcystis aeruginosa* prostřednictvím dosud nespecifikovaných metabolitů (zřejmě nikoli microcystinů) působila negativně na růst obrněnky *Peridinium gatunense*, hustá kultura obrněnky zase vykazovala toxické účinky na sinici a indukovala v ní expresi genu *mcvB*, jehož produkt se podílí na syntéze microcystinů.

Vzájemné alelopatické působení (případně komunikace prostřednictvím chemických signálů) mezi sinicemi a dalšími vodními autotrofy je pravděpodobně značně složité a zdá se, že v ekologii těchto organismů hraje velmi významnou roli. Na alelopatických interakcích se může podílet zřejmě celá řada sloučenin cyanobakteriálního původu a některé z nich mají pro označení alelopatická látka výrazné předpoklady. Aby však mohla být definitivně potvrzena hypotéza o tom, že hlavní smysl jejich produkce sinicemi spočívá v alelopatickém působení, je zapotřebí dalších výzkumů týkajících se zejména určení významnosti jejich alelopatických účinků v reálném prostředí. Nelze ovšem vyloučit, že alelopatické působení pozorované u některých cyanotoxinů může být pouze vedlejší projev a skutečná funkce těchto látek je zcela jiná.

Vodní organismy a především mikroorganismy produkují velké množství látek, které mohou ovlivňovat růst a vývoj ostatních organismů. Látky produkované sinicemi, které ovlivňují růst řas, vodních a případně také suchozemských rostlin, jsou stále předmětem intenzivního výzkumu. Podrobná znalost vztahů mezi organismy je ještě vzdálená, ale již nyní lze z praktického hlediska říci, že např. zavlažovat zahradu či pole vodou, kde jsou vodní květy sinic, určitě nebude pěstovaným rostlinám prospívat, naopak lze očekávat útlum růstu a vyšší frekvenci napadání chorobami a škůdci.