

文章编号: 1674-7054(2020)03-0361-07

## 纤毛纲动物在环境污染物毒性 早期监测和评价中的应用

李国锋<sup>1,3</sup>, 刘诗燕<sup>3</sup>, 杨建春<sup>4</sup>, 陈 帅<sup>2</sup>, 常逢彤<sup>2</sup>, 周海龙<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 药学院, 武汉 430071; 2. 海南大学 生命科学与药学院, 海口 570228;  
3. 安徽微分基因科技有限公司, 合肥 238000; 4. 重庆市奉节县林业局, 重庆 404600)

**摘 要:** 与传统的物理和化学方法相比, 全活细胞在环境毒理监测和评估中具有不可替代的优势。由于纤毛纲动物具有易于培养、个体较大、便于观察、真核且无细胞壁等特点, 因此, 特别适用于环境毒理监测。笔者详细介绍了纤毛纲动物在重金属、持久性有机污染物(POPs)和纳米颗粒污染物质(NP)中的监测进展, 并探讨了纤毛纲动物在应答污染物胁迫的响应机理, 以及将纤毛纲动物研制成生物芯片早期监测的可能性。

**关键词:** 纤毛纲; 毒性; 重金属; POPs; 纳米污染颗粒; 全活细胞生物监测器

中图分类号: X 835

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2020.03.015

纤毛纲(Ciliata)动物隶属于原生动物门(Protozoa), 纤毛纲生物在分类上比较复杂, 尚无统一的定论。纤毛纲动物因其周生遍布纤毛而得名, 其中, 草履虫(*Paramecium Caudatum*)、四膜虫(*Tetrahymena*)等是大家所熟知的代表种类。纤毛纲动物和其他原生动物一样, 身体由单细胞构成, 但有大、小核之分, 大核起营养作用, 小核起生殖作用。其细胞质内有特化的各种胞器, 具有维持生命和延续后代所必需的功能, 即每个原生动物细胞都是一个完整生命体。纤毛纲动物的纤毛类似于真菌的鞭毛, 但比鞭毛更短, 与菌类的鞭毛类似, 纤毛纲动物的纤毛也是作为运动器官而存在<sup>[1-2]</sup>。纤毛纲动物生命力强, 几乎存在于所有水体中, 无论是海水, 还是淡水均有分布。目前已知纤毛纲动物有 3 500 种, 潜在的成员数量预计超过 30 000 种<sup>[3]</sup>。目前, 纤毛纲动物分类还未达成共识, 一般认为纤毛纲动物可分为 6 个亚纲, 分别是: Hymenostomatia(四膜虫所在亚纲), Peniculia(草履虫所在亚纲), Scuticociliatia, Peritrichia, Apostomatia 和 Astomatia<sup>[4-5]</sup>。纤毛纲动物种类繁多, 数量巨大, 无论是清水, 还是受污染的水源均有纤毛纲动物存在, 与细菌一样, 原生动物特别是纤毛纲动物在环境自净中扮演非常重要的角色。纤毛纲动物属于低等单细胞生物, 结构简单, 对环境污染较敏感, 对环境变化的反应很直观, 因而可作为环境监测指示物种, 特别是环境污染的早期监测<sup>[6-9]</sup>。近年来, 随着工业化的不断推进, 环境污染问题日益突出。而纤毛纲动物可作为全生物传感器(whole-cell biosensor)广泛应用于环境污染监测, 尤其是污染物对动物毒性的早期监测和快速评估。与细菌和藻类相比, 纤毛纲动物具有独特的优势, 如它更易培养、个体较大便于观测、真核且无细胞壁(对污染物的响应更直接、更快)、生长速度快、生命周期短等特点。已有大量研究将纤毛纲动物应用于环境污染早期监测和评估<sup>[1-3]</sup>。笔者侧重介绍纤毛纲动物在环境评价中的应用, 特别是在重金属、POPs、纳米颗粒污染物方面的应用, 旨在为相关研究及其应用提供参考。

收稿日期: 2019-06-20

修回日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(41161077)

第一作者: 李国锋(1986-), 男, 武汉大学药学院 2017 级硕士研究生. E-mail: morality9@gmail.com

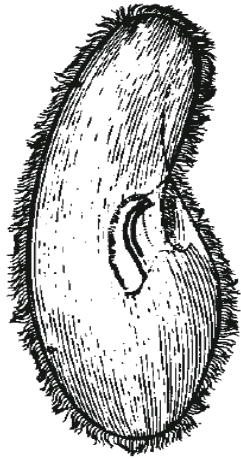
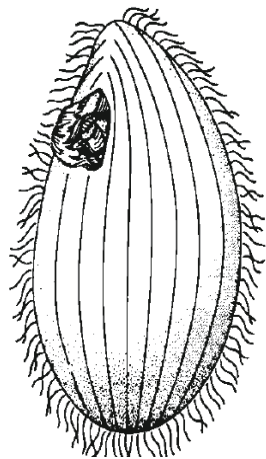
通信作者: 周海龙(1977-), 男, 教授, 博导. 研究方向: 海洋环境生物学. E-mail: zhouhl@hainanu.edu.cn

## 1 纤毛纲动物在主要污染物监测中的应用

**1.1 纤毛纲动物的生物学特性** 纤毛纲动物由于繁殖快、生命周期短,因而其生命周期相对简单。可以分为性未成熟阶段、性成熟阶段、死亡、结合分裂阶段、新细胞开启新的一系列短暂可遗传的细胞表型生成阶段(性未成熟阶段),如此周而复始。纤毛纲动物一般以无性生殖为主,进行二分裂<sup>[10]</sup>,分裂时其大核浓缩进行无丝分裂,小核有纺锤体进行有丝分裂,然后细胞质进行分裂<sup>[11]</sup>。少数纤毛纲动物可进行有性生殖,比如在饥饿环境中,细胞开始减数分裂形成配子,而后结合形成遗传物质交换的新个体<sup>[12]</sup>,与其他变异一样,有性生殖产生的变异有利于纤毛纲动物增强对环境的适应能力,并且对有丝分裂的研究有助于了解有丝分裂和线粒体在纤毛纲中的起源<sup>[13]</sup>。纤毛纲代表动物草履虫、四膜虫的生物学特性见表1<sup>[14-16]</sup>。

表1 纤毛纲代表动物草履虫、四膜虫的生物学特性

Tab. 1 The biological characteristics of *Paramecium caudatum* and *Tetrahymena*

物种及其特性 Species and their characteristics	草履虫 <i>Paramecium caudatum</i>	四膜虫 <i>Tetrahymena</i>
外观形态 <sup>[14]</sup>		
目、科归属	咽膜目(Peniculida); 草履虫科(Parameciidae)	膜口目(Hymenostomatida); 四膜科(Tetrahymenidae)
外观特征	平面看像倒置的草鞋,体长80~300 μm; 细胞体内含有两个细胞核(一大一小),两个伸缩泡和一些食物泡; 全身纵行排列布满大致同长的细纤毛。	外观呈椭圆长梨状,体长约50 μm; 细胞体内含有两个细胞核(一大一小); 全身布满数百根4~6 μm长的纤毛,型态上与草履虫十分相似; 身体前端具有口器。
食物及实验室培养方式	主要以水中细菌及其他水里的有机物作为食物,通常用稻草培养基培养。	摄取水中的细菌与其他有机质维生,通常用SPP培养基培养。
生殖方式	1.无性生殖:简单的横裂法; 2.有性生殖:一种接合生殖,由两只草履虫彼此靠近,遗传物质合在一起,经过细胞核分裂、各自分裂成四只草履虫。	1.无性生殖:简单的横裂法; 2.有性生殖:四膜虫交配时,其后代的性别可能和其父母的性别都不一样,有7种可能的性别。

**1.2 纤毛纲动物在主要污染物监测中的应用** 与传统化学和分子生物学方法相比,纤毛纲动物作为活的全细胞生物监测器具有独特的优势,比如对生物利用度(bioavailability),毒性(toxicity)和遗传毒性(genotoxicity)等参数的监测和评估方面,而传统的化学和分子方法难以实现。目前,已有诸多关于纤毛纲在监测和评估各类污染物方面的报道,该领域的最新进展包括用荧光报告蛋白在活细胞内用于报告和检测污染物的影响,将活的全细胞掺入各种生物芯片中,制成监测污染物毒性芯片等<sup>[17]</sup>。综上所述,纤毛纲动物作为单细胞生物在实际环境监测和评估中具有广阔的应用前景。

**1.2.1 纤毛纲动物在监测重金属污染方面的概况** 近年来,随着工业化和人类活动加剧,重金属污染已成为危害环境和公众健康的重要因素。重金属具有高原子量,在工业,家庭,农业,医疗和技术得到广泛应用,在环境中分布已非常广泛,由重金属污染导致的健康和环境问题也受到高度关注。重金属的毒性

取决于剂量、接触途径和种类,以及暴露个体的年龄、性别、遗传和营养状况。其中,砷、镉、铬、铅和汞等具有高毒性,在公共卫生安全及环境保护方面引起了广泛关注。这些金属被认为是全身性毒物,即使在较低暴露水平下也会引起多器官损害;美国环境保护局和国际癌症研究机构将其归为致癌物<sup>[18-20]</sup>。因此,监测和评估重金属污染对于环境安全和人类健康至关重要;然而,传统化学和物理方法对于生物毒性方面的监测无法实现,但全细胞生物监测方法可很好地解决这个问题。大量研究表明,纤毛纲动物是一个非常方便且优质的早期重金属生物毒性监测评价系统<sup>[6,21-22]</sup>。通过毒性暴露实验,统计其一定时间内的半致死浓度( $LC_{50}$ )即可确认其生物毒性。在生物细胞内,重金属主要通过影响细胞器、细胞膜、线粒体、溶酶体、内质网,以及参与代谢、解毒和损伤修复的酶活性,从而产生毒性或导致细胞死亡<sup>[23]</sup>。金属离子可与细胞组中的 DNA 或核蛋白相互作用,导致 DNA 损伤和构象变化以及细胞癌变或凋亡<sup>[24]</sup>。研究表明,活性氧的产生和氧化应激在重金属的毒性和致癌性中发挥关键作用<sup>[6,25]</sup>。纤毛纲动物不仅在早期监测和评估重金属污染方面发挥重要作用,而且在祛除和治理重金属污染方面也具有重要价值<sup>[22,26-27]</sup>,主要通过生物富集法(bioaccumulation)修复重金属。

**1.2.2 纤毛纲动物在监测 POPs 污染方面的进展** 持久性有机污染物(POPs)因其具有远距离迁移、持久性、生物放大、生物积累的能力,以及对人类健康的毒理效应而广受关注<sup>[28]</sup>,人类可通过食物、空气、水广泛接触。另外,日常生活中使用的一些产品也可能含有 POPs,如阻燃剂或表面活性剂等。因此,POPs 几乎存在于地球上的每一个角落。最常见的 POPs,如滴滴涕,苯并芘等。而纤毛纲动物在 POPs 物质的早期监测和生物毒性评估具有独特的优势<sup>[8,29]</sup>。研究表明,POPs 物质对生物的影响主要体现在:(1)会诱导氧化应激,产生活性氧,从而氧化细胞膜脂质和膜蛋白,破坏细胞屏障<sup>[30]</sup>;(2)活性氧还会诱导细胞凋亡<sup>[31]</sup>;(3)许多 POPs 属于环境内分泌干扰物,因此,还会干扰激素信号通路的某个或几个控制点,可能使天然激素的级联反应发生紊乱,从而导致信号被过度抑制或过度增强<sup>[32]</sup>。总之,由于 POPs 的亲脂性和其难降解性,对生物的危害尤为严重。

**1.2.3 纤毛纲动物在监测 NP 污染方面的应用** 伴随着科学进步,纳米技术在许多领域得到广泛应用,包括医药、材料科学、制造业和各种新技术。越来越多的产品含有纳米粒子(NP),然而其对环境和生物的影响了解较少。纳米材料的生态毒性不仅取决于纳米粒子的释放量,还与其物理化学特性(尺寸、表面/体积比、形状、化学成分、吸附和聚合力)有关<sup>[33]</sup>,已有纤毛纲动物在纳米颗粒毒性监测和评估方面的报道<sup>[30,34]</sup>。纳米颗粒主要通过诱导炎症、细胞因子产生、细胞骨架变化、改变囊泡运输、氧化应激、细胞凋亡,以及基因表达的变化和改变细胞信号传导<sup>[34-35]</sup>等方式对纤毛纲动物产生毒性作用,其具体毒理机制尚不清楚。

**1.3 纤毛纲动物应对污染物的响应机制** 目前,纤毛纲动物应用于环境毒理评价的研究方法主要有:(1)观测纤毛纲动物的形态和行为变化;(2)用毒性暴露实验检测污染物的半致死浓度( $LC_{50}$ );(3)用荧光标记显微成像观测污染物在其体内的分布代谢;(4)用彗星电泳方法了解污染物对细胞的损伤情况;(5)用分子生物学手段研究其在体内的代谢。以上方法中的后 3 种方法可了解纤毛纲动物应答污染物的响应机理,其毒理机制主要体现在以下几个方面:(1)诱导氧化应激反应,产生活性氧,进而损伤细胞,这是目前大多数污染物的损伤机理;(2)进入细胞与某些酶和蛋白结合,使其功能失效,如一些容易和蛋白形成络合物的重金属;(3)模拟激素,作用于受体,使其被过度抑制或过度增强(扰乱内分泌系统),如一些 POPs;(4)直接或间接通过细胞核膜,进入细胞核作用于 DNA 或组蛋白,影响基因的表达。这些机理尚不清楚,尚未形成闭环,有待深入研究。

## 2 纤毛纲动物在三类污染物监测中的比较研究

纤毛纲动物在重金属污染、持久性有机污染物(POPs)污染和纳米颗粒(NP)污染三类污染物监测中的比较见表 2<sup>[23,29,34]</sup>。从表 2 可知,纤毛纲动物能较好地检测 3 类污染物,为进一步研究和应用奠定了一定的基础。

表2 纤毛纲动物在重金属、POPs和NP污染中的比较

Tab. 2 Comparison of the performance of *Ciliata* in heavy metal, POPs and NP pollution

特征参数 Characteristics parameters	重金属污染物 Heavy metal pollutant	有机污染物 POPs pollutant	纳米颗粒 NP pollutant
生物毒性特点	被认为是全身性毒物, 已知它们会引起多器官损害, 被归类为人类致癌物。	在动植物、微生物和人类体内蓄积, 破坏生态系统, 导致人类残障和疾病, 包括: 癌症和肿瘤; 神经障碍; 免疫抑制; 生殖疾病等。	对免疫系统的损伤, 对细胞结构的损伤, 致癌性 <sup>[34]</sup> 。
主要研究方法	毒性暴露( $LC_{50}$ ); 荧光显微镜法; 彗星电泳法。	毒性暴露( $LC_{50}$ ); 彗星电泳法	毒性暴露( $LC_{50}$ ); 荧光显微镜法; 电子显微镜和各种分光光度法方法; 彗星电泳法 <sup>[34]</sup> 。
生物可能损伤机理	1、通过影响细胞的一些酶活性产生毒性; 2、可与细胞组分中的DNA和核蛋白相互作用, 导致DNA损伤和构象变化, 导致细胞癌变或凋亡; 3、参与产生活性氧。	1、诱导氧应急反应, 产生活性氧会氧化细胞膜脂质和膜蛋白, 破坏细胞屏障; 2、诱导细胞凋亡; 3、干扰在激素信号通路的某个或几个控制点。	1、诱导炎症, 细胞因子产生; 2、细胞骨架变化, 改变囊泡运输; 3、氧化应激, 细胞凋亡; 4、以及基因表达的变化和改变细胞信号传导响应。
纤毛纲监测能力评价	对污染敏感, 监测效果良好	对污染敏感, 监测效果良好	对污染敏感, 监测效果良好

### 3 展 望

目前, 对纤毛纲动物环境毒性的研究处于初级阶段, 分子机制研究较少, 某种污染物完整的毒性代谢通路并没有绘制完成。纤毛纲动物中2个细胞核各有分工, 小核作为种系遗传, 但不表达基因; 大核提供表达RNA具有营养作用。交配结合, 细胞交换单倍体小核, 新的大核从新的二倍体小核发育而来, 旧的大核自动降解<sup>[9, 36]</sup>。因此研究其核酸分子, 需要找到合适的时期。伴随高通量测序技术的发展, 将有助于进一步揭示大核与小核在遗传和表达方面的分工和作用。关于部分纤毛纲动物基因组、转录组的研究已取得进展<sup>[37-41]</sup>, 值得一提的是纤毛纲中的四膜虫(*Tetrahymena thermophila*)大核基因组测序已完成, 这将有助于深入研究纤毛纲动物<sup>[9]</sup>。此外, 18S核糖体RNA测序也应用于纤毛纲动物的分类及鉴定<sup>[42]</sup>。纤毛纲动物基因组、转录组等信息的积累和破解将有助于深入揭示纤毛纲动物的特性, 以及在进化和环境中的作用。

纤毛纲动物由于其独特结构, 使其成为环境污染早期监测的重要指示生物, 但目前还没有一个标准的流程和系统的数据库。因此, 从其饲养、试验体系、试验动物的数量、实验时间, 暴露过程形态变化、死亡率等一系列指导实验流程的标准有必要尽快建立, 这样有利于数据的积累和标准化, 也更利于将此流程应用于芯片上, 制成全细胞毒性评价芯片<sup>[17]</sup>。在一个全活细胞芯片阵列上, 自动完成纤毛纲对毒性物质的评价流程, 将会是一个非常值得期待的毒性评价系统。此外, 纤毛纲动物毒性评价数据库的建立, 将有助于进一步研究纤毛纲动物在环境毒性评价中的深入应用。相较于细菌、酵母、人体细胞和植物细胞, 对原生动物的研究还很欠缺, 重视度不够。事实上对原生动物的研究有利于解答一些基础的生物学问题, 如线粒体、叶绿体的内共生起源问题。由于原生动物是单细胞, 无细胞壁, 且细胞质较大, 是非常理想的内共生宿主细胞, 特别是原生动物中, 许多有孔虫似乎更具有利于某些藻类进入并定居的宿主<sup>[42]</sup>, 形成内共生生物。因而对原生动物, 特别是对纤毛纲动物的研究是非常有价值的。显然, 目前对原生动物的关注还不够, 分子水平的研究还较少, 亟待开展相关研究工作。常见的模式生物里还无原生动物的影子, 事实上草履虫、四膜虫可作为新的模式生物。此外, 纤毛纲动物生长速度快, 真核, 是理想的真核生物反应器; 可结合基因编辑技术应用于合成生物学。总之, 对原生动物研究、利用和开发具有重要价值。

## 参考文献:

- [1] RICCI N J A B. The behaviour of ciliated protozoa [J]. *Animal Behaviour*, 1990, 40(6): 1048 – 1069.
- [2] PÁRDUCZ B. Ciliary movement and coordination in ciliates [J]. *International Review of Cytology*, 1967, 21: 91 – 128.
- [3] ADL S M, LEANDER B S, SIMPSON A G, et al. Diversity, nomenclature, and taxonomy of protists [J]. *Systematic Biology*, 2007, 56(4): 684 – 689.
- [4] FENG J M, JIANG C Q, WARREN A, et al. Phylogenomic analyses reveal subclass *Scuticociliatia* as the sister group of subclass *Hymenostomatia* within class *Oligohymenophorea* [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2015, 90: 104 – 111.
- [5] CLAMP J C, BRADBURY P C, STRUEDER-KYPKE M, et al. Phylogenetic position of the apostome ciliates (Phylum Ciliophora, Subclass Apostomatia) tested using small subunit rRNA gene sequences [J]. *Denisia*, 2008, 23: 395 – 402.
- [6] GUTIÉRREZ J C, MARTÍN-GONZÁLEZ A, DÍAZ S, et al. Ciliates as a potential source of cellular and molecular biomarkers/biosensors for heavy metal pollution [J]. *European Journal of Protistology*, 2003, 39(4): 461 – 467.
- [7] GOMIERO A, DAGNINO A, NASCI C, et al. The use of protozoa in ecotoxicology: application of multiple endpoint tests of the ciliate *E. crassus* for the evaluation of sediment quality in coastal marine ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 534 – 544.
- [8] ZHOU H, LI G, HUANG R, et al. Initial study on acute toxicity of two typical Persistent Organic Pollutants(POPs) against *Paramecium caudatum* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(1): 37 – 42.
- [9] EISEN J A, COYNE R S, WU M, et al. Macronuclear genome sequence of the ciliate *Tetrahymena thermophila*, a model eukaryote [J]. *PLoS Biology*, 2006, 4(9): 286.
- [10] DILLER W F J J O M. Binary fission and endomixis in the *Trichodina* from tadpoles (*Protozoa, Ciliata*) [J]. *Journal of Morphology*, 1928, 46(2): 521 – 561.
- [11] SIEGEL R J E C R. Nuclear differentiation and transitional cellular phenotypes in the life cycle of *Paramecium* [J]. *Experimental Cell Research*, 1961, 24(1): 6 – 20.
- [12] BERGER J D J E C R. Autogamy in *Paramecium* cell cycle stage-specific commitment to meiosis [J]. *Experimental Cell Research*, 1986, 166(2): 475 – 485.
- [13] TOVAR J. Mitosomes of parasitic protozoa: biology and evolutionary significance [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 277 – 300.
- [14] CORLISS J O. The ciliated protozoa: characterization, classification and guide to the literature [M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 189 – 206.
- [15] BELKIN S J C O I M. Microbial whole-cell sensing systems of environmental pollutants [J]. *Current opinion in microbiology*, 2003, 6(3): 206 – 212.
- [16] DURUIBE J O, OGWUEGBU M O C, EGWURUGWU J N. Heavy metal pollution and human biotoxic effects [J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2007, 2(5): 112 – 118.
- [17] JÄRUP L J B M B. Hazards of heavy metal contamination [J]. *British medical bulletin*, 2003, 68(1): 167 – 182.
- [18] TCHOUNWOU P B, YEDJOU C G, PATLOLLA A K, et al. Molecular, clinical and environmental toxicology [M]. New York and London: Springer, 2012: 133 – 164.
- [19] MADONI P J E P. The acute toxicity of nickel to freshwater ciliates [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(1): 53 – 59.
- [20] MADONI P, DAVOLI D, GORBI G J B O E C, et al. Acute toxicity of lead, chromium, and other heavy metals to ciliates from activated sludge plants [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, 53(3): 420 – 425.
- [21] WANG S, SHI X J M. Biochemistry, molecular mechanisms of metal toxicity and carcinogenesis [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2001, 222(1/2): 3 – 9.
- [22] BEYERSMANN D, HARTWIG A J A O T. Carcinogenic metal compounds: recent insight into molecular and cellular mechanisms [J]. *Archives of Toxicology*, 2008, 82(8): 493 – 512.
- [23] YEDJOU C G, TCHOUNWOU P B. Oxidative stress in human leukemia (HL-60), human liver carcinoma (HepG2), and human (Jurkat-T) cells exposed to arsenic trioxide [J]. *Metal Ions in Biology and Medicine*, 2006, 9: 298 – 303.
- [24] REHMAN A, SHAKOORI F R, SHAKOORI A R J B T. Shakoori, Heavy metal resistant freshwater ciliate, *Euplotes mutabilis*, isolated from industrial effluents has potential to decontaminate wastewater of toxic metals [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9): 3890 – 3895.
- [25] EBBS S, LASAT M, BRADY D, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1424 – 1430.
- [26] IWATA H, TANABE S, SAKAI N, et al. Distribution of persistent organochlorines in the oceanic air and surface seawater and the role of ocean on their global transport and fate [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(6): 1080 – 1098.

- [27] ROUABHI R, BERREBBAH H, DJEBAR M J A J O B. Toxicity evaluation of flucycloxuron and diflubenzuron on the cellular model, *Paramecium sp.* [J]. African Journal of Biotechnology, 2006, 5(1): 45 – 48.
- [28] JEONG C B, KANG H M, LEE Y H, et al. Nanoplastic ingestion enhances toxicity of persistent organic pollutants (POPs) in the monogonont rotifer *Brachionus koreanus* via multixenobiotic resistance (MXR) disruption [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(19): 11411 – 11418.
- [29] MREMA E J, RUBINO F M, BRAMBILLA G, et al. Persistent organochlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity [J]. *Toxicology*, 2013, 307: 74 – 88.
- [30] SWEDENBORG E, RÜEGG J, MÄKELÄ S, et al. Endocrine disruptive chemicals: mechanisms of action and involvement in metabolic disorders [J]. *Journal of Molecular Endocrinology*, 2009, 43(1): 1 – 10.
- [31] KAHRU A, DUBOURGUIER H-C, BLINOVA I, et al. Biotests and biosensors for ecotoxicology of metal oxide nanoparticles: a minireview [J]. *Sensors*, 2008, 8(8): 5153 – 5170.
- [32] FENT K. Nanoparticles in the water cycle [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 183 – 205.
- [33] OBERDÖRSTER E, ZHU S, BLICKLEY T M, et al. Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: Effects of fullerene (C60) on aquatic organisms [J]. *Carbon*, 2006, 44(6): 1112 – 1120.
- [34] HOEGH-GULDBERG O, HUGHES L, MCINTYRE S, et al. Assisted colonization and rapid climate change [J]. *Science*, 2008, 32: 1345 – 346.
- [35] PRESCOTT D M J M M B R. The DNA of ciliated protozoa [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1994, 58(2): 233 – 267.
- [36] PRITCHARD A, SEILHAMER J, MAHALINGAM R, et al. Nucleotide sequence of the mitochondrial genome of *Paramecium* [J]. *Nucleic Acids Research*, 1990, 18(1): 173 – 180.
- [37] STEELE C J, BARKOCY-GALLAGHER G A, PREER L B, et al. Developmentally excised sequences in micronuclear DNA of *Paramecium* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1994, 91(6): 2255 – 2259.
- [38] ARNAIZ O, GOÛT J-F, BÉTERMIER M, et al. Gene expression in a paleopolyploid: a transcriptome resource for the ciliate *Paramecium tetraurelia* [J]. *BMC Genomics*, 2010, 11(1): 547.
- [39] XIONG J, LU X, ZHOU Z, et al. Transcriptome analysis of the model protozoan, *Tetrahymena thermophila*, using deep RNA sequencing [J]. *PLoS one*, 2012, 7(2): 30630.
- [40] CHEAIB M, DEHGHANI AMIRABAD A, NORDSTRÖM K J, et al. Epigenetic regulation of serotype expression antagonizes transcriptome dynamics in *Paramecium tetraurelia* [J]. *DNA Research*, 2015, 22(4): 293 – 305.
- [41] ISHAQ S L, WRIGHT A-D G J A E M. Design and validation of four new primers for next-generation sequencing to target the 18S rRNA genes of gastrointestinal ciliate protozoa [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(17): 5515 – 5521.
- [42] CAVALIER-SMITH T, LEE J J J T J O P. Protozoa as hosts for endosymbioses and the conversion of symbionts into organelles [J]. *The Journal of Protozoology*, 1985, 32(3): 376 – 379.

## Application of the Ciliata in Early Monitoring and Evaluation of Ecological Toxicity

LI Guofeng<sup>1,3</sup>, LIU Shiyan<sup>3</sup>, YANG Jianchun<sup>4</sup>, CHEN Shuai<sup>2</sup>, CHANG Fengtong<sup>2</sup>, ZHOU Hailong<sup>2</sup>

(1. School of Pharmaceutical Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Life Science and Pharmacy, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Anhui Microanaly Genentech Co., Ltd., Hefei, Anhui 238000, China;

4. Fengjie County Forestry Bureau, Chongqing, 404600, China)

**Abstract:** Compared to traditional chemical and physical methods, the whole-cell biosensor has an irreplaceable advantage in the monitoring and evaluation of environmental toxicology. The Ciliata is the best in the whole-cell living biosensor because of its easy culture, large size for easy observation, eukaryotic and no cell wall. The monitoring performance of the Ciliata in heavy metals, persistent organic pollutants (POPs) and

nanoparticle pollutants (NP) was described, and the metabolic mechanism of the Ciliata in exposure to these pollutants and the possibility of using the Ciliata organism as a standard whole-cell living biosensor chip to monitor early environmental pollution were discussed. In summary, the Ciliata Bio-toxicity Assessment System is an ideal early monitoring and evaluation system for environmental pollutants, but the research on the Ciliata is still at a relatively early stage, and a lot of research work needs to be done.

**Keywords:** ciliata; toxicity; heavy metal; POPs; nanoparticle pollutants; whole-cell living biosensor

(责任编辑: 潘学峰)

(上接第 360 页)

## **Analysis of Rainwater Management in Urban Parks of Haikou under the Concept of Sponge City**

XU Xiaoqian, CHEN Zhanchuan, CHEN Xu, WANG Ning, DENG Tao

(College of Tropical agriculture and forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

**Abstract:** Building a complete sponge system in the city can effectively solve the problems of urban rainwater drainage and effective utilization of rainwater resources. Urban parks are an important part of a city under the concept of sponge city and play an indispensable role in the drainage and utilization of urban rainwater. However, the traditional urban parks are only focused on their landscape effect but not on the rainwater drainage and storage capacity in their green space. A survey was made of urban parks in Haikou and the rainwater management in the urban parks, and the existing problems arising from the traditional urban parks were analyzed, based on which were put forward a rainwater management strategy for establishment of urban parks in a sponge way to provide reference for construction and promotion of sponge-type urban parks in the future.

**Keywords:** sponge city; urban park; Haikou; rainwater management

(责任编辑: 叶 静)