

安莉莎,殷高方,甘婷婷,等.亚心形扁藻运动参数对海水中重金属响应特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2897-2904.

An L S, Yin G F, Gan T T, et al. The motion parameters of *Platymonas subcordiformis* in response to heavy metals [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2897-2904.

亚心形扁藻运动参数对海水中重金属响应特征

安莉莎^{1,2,3},殷高方^{1,2,3,4*},甘婷婷^{1,3**},赵南京^{1,2,3,4},谭小璇^{1,2,3},王涛¹,黄朋^{1,3} (1.中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所,中国科学院环境光学与技术重点实验室,安徽合肥 230031; 2.中国科学技术大学,安徽合肥 230026; 3.安徽省环境光学监测技术重点实验室,安徽合肥 230031; 4.合肥综合性科学中心环境研究院,安徽合肥 230601)

摘要: 现有海洋污染的生物毒性检测方法均存在毒性响应时间长,难以实现海洋污染物快速响应难题.以具有能动性的海洋微藻亚心形扁藻为受试生物,研究了其运动性对海洋典型重金属污染物汞(Hg)和铬(Cr)的毒性响应性能,以期建立海洋生物毒性快速检测方法提供依据.结果表明:2h内,亚心形扁藻的运动参数,包括运动方式、运动能力和游泳速度对0.075~2.5mg/L Hg和0.1~3mg/L Cr均产生了明显的响应,运动性参数与两种重金属浓度间都呈现良好的剂量-效应关系;基于不同运动性参数获得Hg和Cr的2h-EC₅₀值分别为0.63~2.38mg/L和0.60~2.49mg/L;总体上,不同运动参数中曲线运动速度(VSL)对重金属Hg和Cr毒性具有最灵敏的响应,以VSL为响应指标获得的Hg和Cr的2h胁迫下的半抑制浓度值(2h-EC₅₀值)分别为0.63和0.60mg/L.上述结果与传统毒性试验(包括微藻72h生长抑制试验、24~48h光合抑制试验和96h鱼类死亡试验)结果均具有可比性,且毒性响应时间大大缩短,表明微藻运动性作为一种新型生物测试指标可以对海洋重金属类污染物毒性进行快速、有效评价.

关键词: 运动性; 海洋微藻; 重金属; 海洋污染; 生物毒性

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2897-08

The motion parameters of *Platymonas subcordiformis* in response to heavy metals. AN Li-sha^{1,2,3}, YIN Gao-fang^{1,2,3,4*}, GAN Ting-ting^{1,3**}, ZHAO Nan-jing^{1,2,3,4}, TAN Xiao-xuan^{1,2,3}, WANG Tao¹, HUANG Peng^{1,3} (1.Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2.University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3.Anhui Key Laboratory of Environmental Optical Monitoring Technology, Hefei 230031, China; 4. Hefei Institute of Environment, Hefei Comprehensive Science Center, Hefei 230601, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2897~2904

Abstract: The rapid detection of biological toxicity of Marine pollution is of great significance to the emergency monitoring of sudden Marine water pollution accidents, the rapid investigation and evaluation of Marine environment ecological risks, and the protection of Marine environment. However, existing biological toxicity detection methods have a long toxic response time, and it is difficult to realize the rapid response of Marine pollutants. In view of this, this study has taken the active marine microalgae, *Platymonas subcordiformis*, as the test organism to study its mobility response to typical heavy metal pollutants Mercury (Hg) and Chromium (Cr) in seawater, in order to provide a basis for establishing a rapid detection method for marine biological toxicity. The results have showed that within 2h, the motion parameters of the *Platymonas subcordiformis*, including movement mode, movement ability, and swimming velocity, exhibited significant response characteristics to 0.075~2.5mg/L Hg and 0.1~3mg/L Cr, and there was a good dose-response relationship between the motion parameters and the concentrations of the two independent heavy metals; The 2h-EC₅₀ values of Hg and Cr obtained based on different motion parameters were 0.63~2.38mg/L and 0.60~2.49mg/L, respectively; Overall, among different motion parameters, the curve velocity (VSL) has the most sensitive response to the toxicity of heavy metals Hg and Cr. The 2h-EC₅₀ values of Hg and Cr obtained using VSL as the response index are 0.63 and 0.60mg/L respectively. The above results are comparable to traditional toxicity tests (including microalgae 72-hour growth inhibition test, 24~48 hours photosynthesis inhibition test, and 96-hour fish death test), and the toxicity response time is significantly reduced, indicating that microalgae motility as a new biological testing indicator can quickly and effectively evaluate the toxicity of marine heavy metal pollutants.

Key words: motility; marine microalgae; heavy metals; marine pollution; biological toxicity

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(62375270);合肥综合性科学中心环境研究院科研团队建设项目(HYKYTD2024004);皖江新兴产业技术发展中心科研项目(WJ23CYHXM03);国家工程研究中心开放基金(2024KFJ0108);珠海市产学研合作项目(2320004002782);中国仪器仪表学会科学仪器托举计划项目(CISTJ2024)

* 责任作者, 研究员, gfyin@aiofm.ac.cn, ** 副研究员, ttgan@aiofm.ac.cn

重金属、石油、核、微塑料等海洋污染问题日趋严重.在我国,大鹏湾水体和珠江口水体中都曾出现 Cr 超标,Hg 是渤海湾沉积物中的主要污染物,长江口春、夏两季 Hg 污染严重^[1-4],汞、铬及其化合物已被列为优先控制污染物^[5].海洋重金属污染既破坏海洋生物多样性,又严重威胁人体健康^[6-9].

微藻作为海洋主要初级生产者,对整个海洋生态系统能量与物质流动具有驱动作用,并且藻类因个体小、对毒物敏感,是海洋生物毒性检测非常理想的受试生物.但目前,以藻类为受试生物的两类水质生物毒性检测方法:依据藻细胞生长状况的生长抑制法和依据藻类光合作用状态的光合抑制法用于毒性检测时都具有一定的局限性:生长抑制法毒性响应时间长,无法实现紧急突发事件的现场快速检测,而光合抑制法所能响应的污染物种类不够全面,无法对水体综合毒性进行准确判断.

在藻细胞中,鞭毛作为微管动力蛋白臂与相邻的微管蛋白相互桥接的组织机构,其 ATP 水解产生的能量会促进相邻微管间发生相对滑动,使得鞭毛摆动而产生动力,促进藻细胞具有“前进—翻转”等运动模式^[11-13].运动性作为藻类的一种生理特性,当藻类受到毒物影响时,藻类的运动性就会作出相应反应,因此藻类运动性能够用于指示污染物的毒性大小,目前,相关研究已表明重金属铜、铅、有机物苯酚、壬基酚、多溴二苯醚等环境污染物均能影响海洋微藻的运动性能^[14-16].但由于藻类运动性能对毒性污染物的响应特性尚且未知,目前尚未形成基于藻类运动性的海洋污染生物检测方法.

鉴于此,本文以我国沿海具有运动特性的微藻亚心形扁藻为受试物种,系统研究了其运动性对典型海洋重金属污染物汞(Hg)和铬(Cr)的响应性能,以期为建立基于藻类运动性的海洋污染生物检测方法提供重要依据.

1 材料与方法

1.1 藻种的获取与培养

所用受试藻种为采购于上海光语生物科技有限公司的亚心形扁藻.首先,在无菌环境下将藻种接种于灭菌后的 F/2 培养基^[14]中,再将接种后的藻液

置于光合有效辐射为 $120\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、光暗比为 1:1(即 1d 之内光照 12h,无光照 12h)、温度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 的恒温培养箱中扩大培养.最后将培养到 16~22d 的亚心形扁藻用于重金属的毒性暴露实验.

1.2 毒性暴露实验

研究所用重金属 Hg 和 Cr 分别是来源于国药集团化学试剂有限公司的氯化汞及天津市光复精细化工研究所的硝酸铬.采用灭菌后的 F/2 培养基分别将氯化汞和硝酸铬溶解,配制成浓度为 5mg/L 的 Hg 储备液和 Cr 储备液,并用灭菌后的 F/2 培养基进一步稀释配制成浓度分别为 0.5, 0.05, 0.005mg/L 的 Hg 工作液和 Cr 工作液.毒性暴露实验中将一定量的 Hg 或 Cr 工作液分别加入到 2.5mL 藻培养液中,配制成重金属浓度分别为 0.01, 0.025, 0.07, 0.075, 0.08, 0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 2, 2.5, 3mg/L 的重金属-藻混合溶液,即为测试藻液.

在胁迫时间分别为 0 和 2h 时,取 20 μL 测试藻液于载玻片上,盖上盖玻片后置于尼康 NI-E/NI-U 研究级生物显微镜下,在 40x 放大倍率物镜下,使用 CCD 相机捕获 30s 藻细胞运动视频(avi 格式)以观测藻细胞的运动性能.

1.3 藻类多细胞运动性跟踪与运动参数的获取

表 1 运动参数物理学意义及测量计算方式

Table 1 Physical significance of motility parameters and measurement and calculation method

参数	物理意义及计算方法
曲线运动速度 VCL($\mu\text{m}/\text{s}$)	沿其实际曲线运动的速度
平均路径速度 VAP($\mu\text{m}/\text{s}$)	沿其平均路径运动的速度,计算机按照一定算法将实际路径平滑处理所得
直线运动速度 VSL($\mu\text{m}/\text{s}$)	始末位置直线运动的速度
直线性 LIN	运动轨迹的直线分离度, $\text{LIN}=\text{VSL}/\text{VCL}$
摆动性 WOB	运动轨迹的摆动程度, $\text{WOB}=\text{VAP}/\text{VCL}$
向前性 STR	$\text{STR}=\text{VSL}/\text{VAP}$

先使用 RisingView 软件拍摄藻细胞的运动视频作为研究样本,将视频保存为 avi 格式,后使用团队开发的浮游生物新型多目标跟踪方法^[17]软件处理视频,进行亚心形扁藻的运动性跟踪并获取坐标信息.跟踪软件中,将细胞第一次出现在观察视野中的位置定义为始位置,将细胞消失在观察视野前的位置定义为末位置.根据获取的坐标信息,计算平均曲线速度(VCL)、平均直线速度(VSL)、平均路径速度(VAP)、直线性(LIN)、向前性(STR)和摆动性

(WOB)的 6 个运动性参数,各运动参数物理学意义及测量计算方法如表 1 所示.将空白组和染毒组通过软件所获取的各个细胞运动参数取平均值后,计算每个参数的促进率或抑制率.

2 结果与分析

2.1 藻细胞整体运动性能对重金属毒性的响应

具有能动性的海洋微藻具有运动器官并能够通过一定的节拍运动控制转向.绿藻主要的运动器官是鞭毛,亚心形扁藻作为海洋绿藻在未受到污染物毒害的情况下,通过摆动 2~4 根鞭毛,沿着螺旋路径翻滚,完成游泳行为^[11-12].而当水体受到 Hg 或 Cr 污染后,亚心形扁藻自由翻转不再顺畅,藻细胞运动速度有所下降,并且下降程度与污染物浓度间呈现明显的剂量-效应关系.当亚心形扁藻进一步受到重金属毒害影响时,其运动速度进一步下降,甚至开始原地打转、震颤直到完全不动.图 1 中,对照组中亚心形扁藻细胞 10 帧内横坐标位置变化最大为 333.55Pixel(像素),纵坐标位置变化最大为 411.21Pixel.图 2 中,染毒组中亚心形扁藻细胞 10 帧内横坐标位置变化最大为 11.53Pixel,纵坐标位置变化最大为 3.96Pixel.由此可见,染毒组亚心形扁藻细胞 10 帧的运动距离与空白组相比,明显变短,亚心形扁藻整体运动性能均随两种重金属浓度的增加而减弱,因此藻类运动性能对重金属毒性具有响应特性.

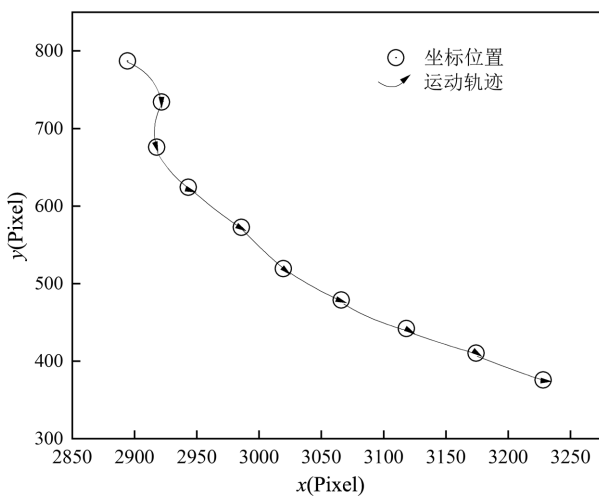


图 1 空白对照组亚心形扁藻细胞的运动轨迹
Fig.1 Movement track of *P. subcordiformis* in the control group

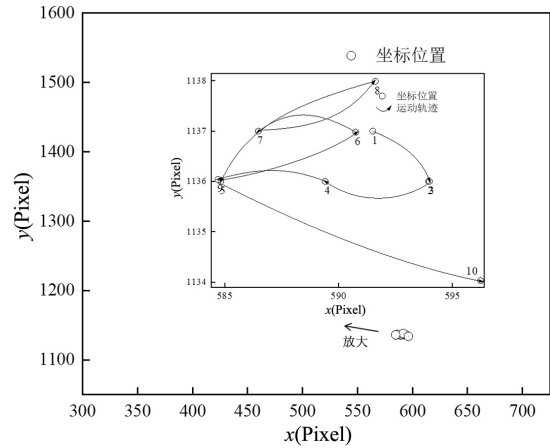


图 2 染毒组亚心形扁藻细胞的运动轨迹
Fig.2 Movement track of *P. subcordiformis* under the stress of heavy metal

2.2 不同运动参数对重金属毒性的响应特性

借助现代机器智能识别系统偶联计算机细胞跟踪技术,在亚心形扁藻细胞动态跟踪的基础上,分别获得重金属胁迫 2h 时空白对照藻样及胁迫藻样的运动参数(VCL,VAP,VSL,LIN,WOB,STR),并采用 SPSS 分析了每一浓度重金属胁迫下亚心形扁藻各项运动参数与空白对照藻样间的差异显著性,在此基础上将胁迫藻样各项运动参数与空白对照藻样对比计算了各项参数的抑制率,结果如图 3 和图 4 所示.可以看出,在 2h 时,亚心形扁藻的 6 个运动性参数对 Hg 和 Cr 都可做出响应.当 Hg 的浓度达到 0.075mg/L、Cr 的浓度达到 0.1mg/L 时,

亚心形扁藻的运动参数开始产生了明显响应,当 Hg 浓度达到 2.5mg/L、Cr 浓度达到 3mg/L 时,亚心形扁藻部分运动性参数抑制率已高达 90%以上,表明藻细胞的某些方面运动性能近乎完全丧失.

进一步对比不同运动参数对 Hg 和 Cr 的响应性能,由图 3 可以看出,当 Hg 浓度在 0.075~0.1mg/L 时,亚心形扁藻染毒组与空白对照组间的 VCL、VAP、VSL 参数已具有显著的抑制效应($P<0.05$),而 LIN、WOB、STR 参数并无显著性差异($P>0.05$);当 Hg 浓度 ≥ 0.4 mg/L 时,染毒组与空白对照组间 VCL、VAP、VSL、LIN、WOB、STR 六个运动参数均已具有显著差异性($P<0.05$),呈现出显著的抑制效应.且对于每一浓度重金属 Hg 胁迫下的亚心形扁藻,VSL 参数的抑制率均显著高于其他参数.由图 4 可以看出,动植物及微生物中广泛存在着毒物兴奋效应(Hormesis),这种现象因环境中的温度、辐射、金属

离子、除草剂、氮的沉积以及臭氧水平等多种因素刺激所致,低剂量表现出促进作用,高剂量表现出抑制作用.0.075~0.3mg/L 的 Cr^{3+} 作用下,微藻某些运动参数的抑制率出现负值,这些参数受到低剂量刺激时表现出促进作用^[18-22].

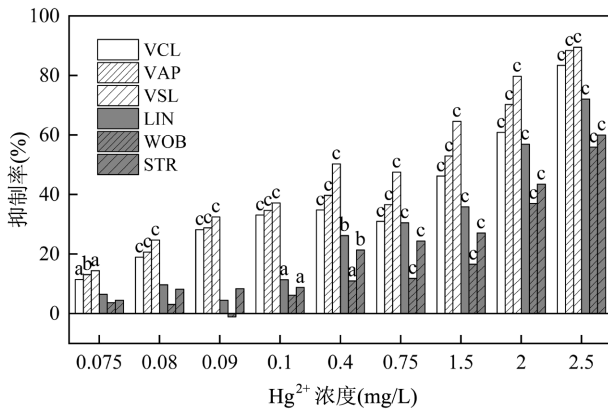


图3 Hg^{2+} 作用下亚心形扁藻不同运动参数的抑制率以及显著性分析

Fig.3 Inhibition ratio and significance analysis of different motility parameters of *P. subcordiformis* under the stress of Hg^{2+}
a: $0.01 < P < 0.05$, b: $0.001 < P < 0.01$, c: $P < 0.001$

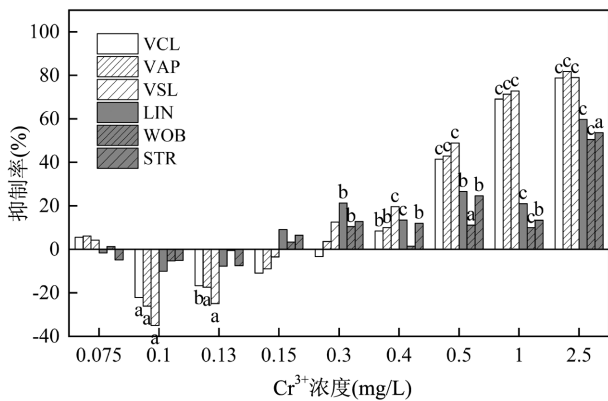


图4 Cr^{3+} 作用下亚心形扁藻不同的运动参数的抑制率以及显著性差异

Fig.4 Inhibition ratio and significance analysis of different motility parameters of *P. subcordiformis* under the stress of Cr^{3+}
a: $0.01 < P < 0.05$, b: $0.001 < P < 0.01$, c: $P < 0.001$

当Cr 的浓度在 0.1~0.13mg/L 范围内时,亚心形扁藻染毒组与空白对照组间的 VCL、VAP、VSL 已具有显著性差异($P < 0.05$),而其他参数差异性并不显著($P > 0.05$).当染毒组与空白对照组间 LIN、WOB、

STR 参数均具有显著性差异时($0.001 < P < 0.05$),Cr 的浓度需达到 0.5mg/L,而此时染毒组的 VCL、VAP、VSL 参数均与空白对照组已具有极显著性差异($P < 0.001$).且在 0.075~3mg/L Cr 胁迫下,对于大多数浓度,VSL 参数具有最大的抑制率或促进率.

将图 3 和图 4 中不同浓度 Hg 和 Cr 作用下亚心形扁藻各项运动参数的抑制率平均值进行对比,结果如图 5 和图 6 所示.

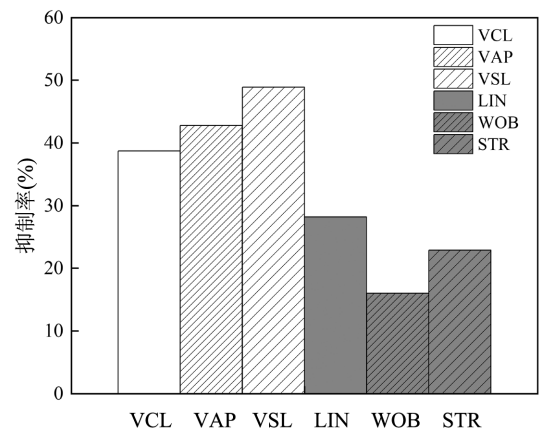


图5 Hg^{2+} 作用下亚心形扁藻各项运动参数的平均抑制率
Fig.5 Everage inhibition ratio of motility parameters of *P. subcordiformis* under the stress of Hg^{2+}

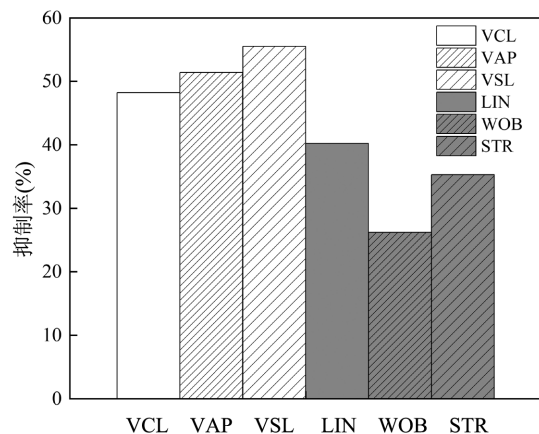


图6 Cr^{3+} 作用下亚心形扁藻各项运动参数的平均抑制率
Fig.6 Everage inhibition ratio of motility parameters of *P. subcordiformis* under the stress of Cr^{3+}

结果表明,无论是 Hg 胁迫下还是 Cr 胁迫下,在 6 个参数中,VSL 抑制率的平均值均显著大于其它 5 个参数,与 VCL、VAP、LIN、WOB、STR 相比,对于重金属 Hg,VSL 抑制率平均值分别增加了 26.5%、14.3%、73.6%、205.2%和 113.5%;对于重金属 Cr,VSL 抑制率平均值分别增加了 15.2%、8.0%、38.2%、112.1%和 57.0%.

为了明确亚心形扁藻不同运动参数对重金属毒性的定量响应性能,将暴露 2h 时亚心形扁藻各项运动参数(VCL,VAP,VSL,LIN,WOB,STR)的抑制率与 Hg 和 Cr 的浓度进行非线性拟合,结果如图 7、图 8 所示.结果表明,6 个运动参数的抑制率与 2 种重金

属的浓度间都具有三次多项式非线性关系,相关系数 R^2 均大于 0.92,表明亚心形扁藻的 VCL、VAP、VSL、LIN、WOB、STR 这 6 个运动参数与重金属浓度间均有剂量-效应毒性响应特性,能够用于重金属毒性的定量检测.

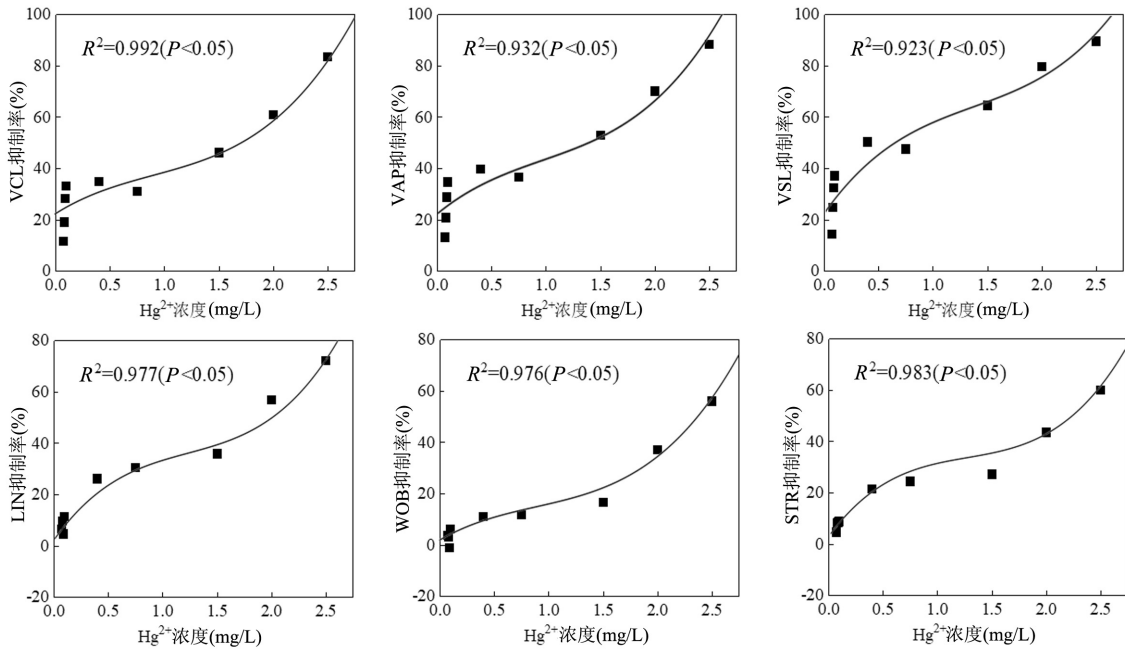


图 7 亚心形扁藻不同运动参数抑制率与 Hg²⁺浓度间的剂量效应关系曲线

Fig.7 Dose-effect relationship curve between inhibition rates of different motility parameters and Hg²⁺ concentrations of *P. subcordiformis*

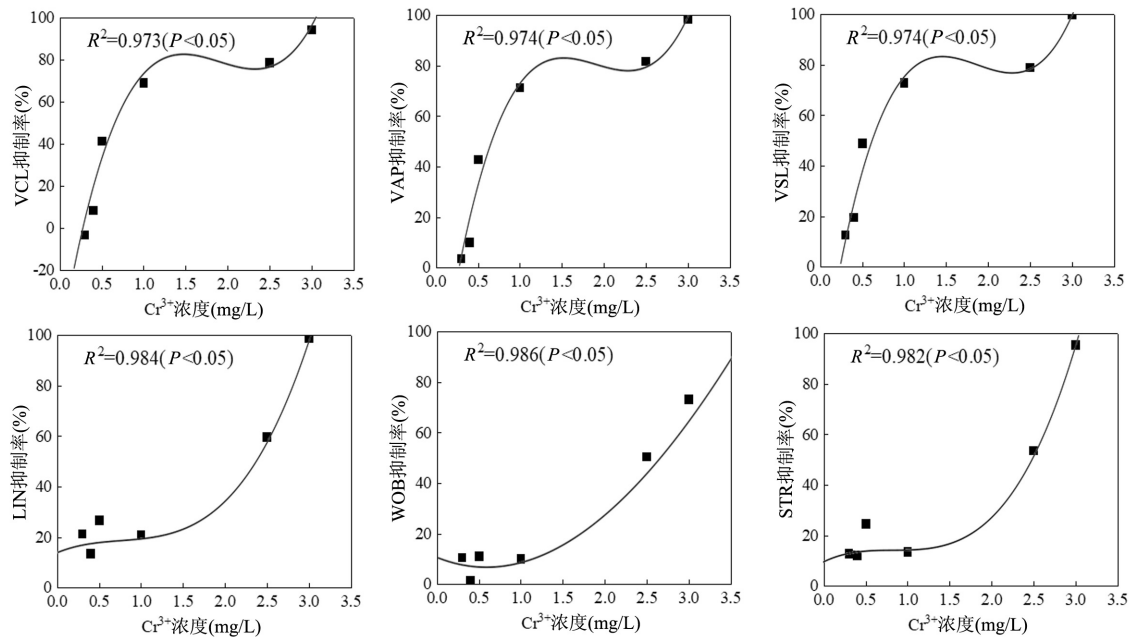


图 8 亚心形扁藻不同运动参数抑制率与 Cr³⁺浓度间的剂量效应关系曲线

Fig. 8Dose-effect relationship curve between inhibition rates of different motility parameters and Cr³⁺ concentrations of *P. subcordiformis*

基于亚心形扁藻不同运动参数与重金属 Hg 和 Cr 间的剂量-效应关系曲线及图 3 与图 4 中染毒组与空白对照组间运动参数的差异显著性,分别获取基于不同运动参数的 Hg 和 Cr 的最低有效浓度 (LOEC 值)、半数抑制浓度 (EC₅₀ 值)、90%抑制浓度 (EC₉₀ 值),结果如图 9 和图 10 所示。

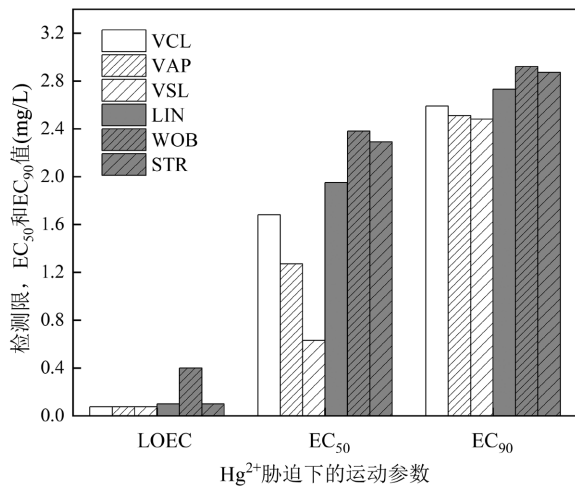


图 9 基于不同运动参数获取的 Hg 的 LOEC、2h-EC₅₀ 及 2h-EC₉₀

Fig.9 Corresponding detection limits, EC₅₀ and EC₉₀ values based on different motility parameters under the stress of Hg²⁺

由图 9 可以看出,对于 Hg,以 6 种不同运动性参数作为毒性响应指标的 2h-LOEC 值为 0.075~0.4mg/L、2h-EC₅₀ 值为 0.63~2.38mg/L、2h-EC₉₀ 值为 2.48~2.92mg/L.其中,基于 VSL 获取的 2h-LOEC 值、2h-EC₅₀ 值、2h-EC₉₀ 值分别为 0.075mg/L, 0.63mg/L, 2.48mg/L,均为最小值,与基于其他 5 个参数获取的 2h-LOEC 值、2h-EC₅₀ 值、2h-EC₉₀ 值相比分别降低了 0~81.3%、50.4%~73.5%、1.2%~15.1%。

由图 10 可以看出,对于 Cr,以 6 种不同运动性参数作为毒性响应指标的 2h-LOEC 值为 0.3~0.4mg/L、2h-EC₅₀ 值为 0.60~2.49mg/L、2h-EC₉₀ 值为 2.76~3.32mg/L.其中,基于 VSL 获取的 2h-LOEC 值、2h-EC₅₀ 值、2h-EC₉₀ 值分别为 0.4mg/L, 0.6mg/L, 2.76mg/L,在 6 个参数中基于 VSL 获取的 2h-EC₅₀ 值、2h-EC₉₀ 值均为最小值,与其他 5 个参数相比分别降低了 9.1%~75.9%、2.8%~16.9%。

上述研究表明,亚心形扁藻运动性能对重金属毒性具有快速响应特性,2h 时即可作出毒性响应,其中 VCL、VAP、VSL、LIN、WOB、STR 各项运动

参数对重金属毒性均具有较好的剂量-效应定量响应性能,均能够用于重金属毒性的定量检测,且在 6 个参数中,无论是在参数抑制率方面,还是基于不同参数获取的 LOEC 值、EC₅₀ 值、EC₉₀ 值方面,运动参数 VSL 对重金属毒性均表现出了最灵敏的响应特性.速度参数之间的敏感性差异归因于不同类别污染物的作用机理差异,重金属污染物暴露条件下,亚心形扁藻细胞活力显著降低,细胞内 ATP 和光合色素的含量显著降低,以及催化糖酵解的酶活性降低,优先供应给关键的生理过程更多能量,可用于运动行为的能量变少,同时细胞产生了过量的活性氧 (ROS),加剧了脂质过氧化过程,诱导抗氧化酶活性,过度的氧化应激损伤了鞭毛膜,藻类运动因此受到抑制^[23].因此亚心形扁藻运动性能特别是 VSL 参数能够用于海洋重金属污染毒性的快速检测。

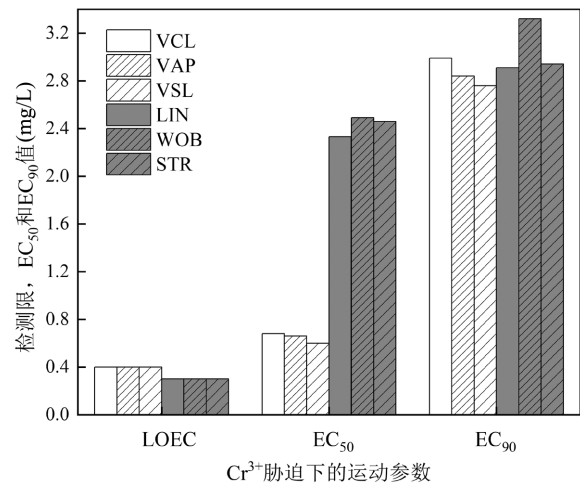


图 10 基于不同运动参数获取的 Cr 的 LOEC、2h-EC₅₀ 及 2h-EC₉₀

Fig.10 Corresponding detection limits, EC₅₀ and EC₉₀ values based on different motility parameters under the stress of Cr³⁺

2.3 藻类运动性能与其他毒性测试方法对重金属毒性响应性能对比

将本研究中 VSL 所对应的 Hg 和 Cr 的 EC₅₀ 值及毒性响应时间与已报道的其它毒性检测方法(如藻类光合抑制法、藻类生长抑制法、鱼类生物毒性检测等)所对应的 Hg 和 Cr 的 EC₅₀ 值及毒性响应时间进行对比,分析藻类运动性用于海洋重金属毒性检测的优势,结果如表 2 所示.通过对比可知,基于亚心形扁藻 VSL 这一运动参数所获取的重金属毒性数据与其他毒性检测方法均具有可比性,且与其他

毒性检测方法的毒性响应时间相比具有较大程度的降低,可由 24~96h 缩短至 2h。由此可见,藻类运动

性能是建立海洋污染毒性现场快速检测方法、实现海洋污染毒性检测与评估的重要指示指标。

表 2 基于不同毒性测试方法所获得的 Hg 和 Cr 的 EC_{50} 值
Table 2 EC_{50} values based on a variety of toxicity assay methods under the stress of Hg^{2+} or Cr^{3+}

受试物	指标	EC_{50} (mg/L)	试验方法		文献	
			受试生物	响应时间(h)		
Hg	VSL	0.63	亚心形扁藻	2	运动性方法	本研究
	叶绿素荧光参数	0.76	FACHB-889 衣藻	96	藻类光合抑制法	[24]
	行为变化	0.19	斑马鱼	48	小鱼行为变化	[25]
Cr	VSL	0.6	亚心形扁藻	2	运动性方法	本研究
	细胞生长抑制百分率	0.14	四尾栅藻	96	生长抑制法	[26]
	行为变化	1.03	亚洲鲈鱼幼鱼	96	小鱼行为变化	[27]

3 结论

3.1 亚心形扁藻所有运动性参数(VCL、VAP、VSL、LIN、WOB、STR)对 Hg 和 Cr 都具有剂量-效应毒性响应特性,均能够用于重金属的定量检测。

3.2 在六个参数中,VSL 对重金属表现出了最灵敏的毒性响应,获得的 Hg 和 Cr 的 2h- EC_{50} 值分别为 0.63mg/L 和 0.60mg/L。

3.3 与传统毒性试验方法相比,藻类运动性能对重金属毒性响应时间大大缩短,是实现海洋污染生物毒性快速检测与评估的重要工具。本研究为后续建立海洋污染生物毒性现场快速检测方法提供了重要基础与依据,对保障海洋生态环境安全具有重要作用与意义。

参考文献:

- [1] 刘慧杰,刘文君,刘继平,等.南中国海表层海水重金属含量及其潜在生态风险分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3891-3898.
Liu H J, Liu W J, Liu J P, et al. Heavy metals concentration and its potential ecological risk assessment of surface seawater in South China Sea [J]. China Environmental Science, 2017,37(10):3891-3898.
- [2] 黄向青,张顺枝,霍振海.深圳大鹏湾、珠江口海水有害重金属分布特征 [J]. 海洋湖沼通报, 2005,(4):38-44.
Huang X Q, Zhang S Z, Huo Z H, et al. Heavy metal distribution in seawater in Dapeng Bay of Shenzhen and the Pearl River estuary [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2005,(4):38-44.
- [3] 齐凤霞,郑丙辉,万峻,等.渤海湾(天津段)柱样沉积物重金属污染研究 [J]. 海洋技术, 2004,(3):85-91.
Qi F X, Zheng B H, Wan J, et al. Pollution of Heavy metal in the sample of column of Bohai Bay in Tianjin [J]. Journal of Ocean Technology, 2004,(3):85-91.
- [4] 黄厚见,平仙隐,李磊,等.春、夏季长江口水体、沉积物及生物体中重金属含量及其评价 [J]. 生态环境学报, 2011,20(5):898-903.

- Huang H J, Ping X Y, Li L, et al. Concentrations and assessment of heavy metals in seawater, sediments and aquatic organisms at Yangtze River estuary in spring and summer [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011,20(5):898-903.
- [5] 康凯莉,管博,李正炎.中国近海环境中汞的水质基准与生态风险 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019,49(1):102-114.
Kang K L, Guan B, Li Z Y, et al. Marine water quality criteria derivation and ecological risk assessment for mercury in coastal waters in China [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019,49(1): 102-114.
- [6] 季兴财.莆田市平海湾地下水质量现状及污染因子贡献度分析 [J]. 黑龙江环境通报, 2019,43(4):23-26,59.
Ji X C. Analysis on present situation and the contribution degree of pollution factors of groundwater quality in Pinghai Bay, Putian [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2019,43(4):23-26,59.
- [7] 陈方涛,李志勇,张扬,等.渤海海洋环境污染的现状与防治浅谈 [J]. 资源节约与环保, 2023,(1):9-13,42.
Chen F T, Li Z Y, Zhang Y, et al. Discussion on the current situation and prevention and control of Marine Environmental pollution in Bohai Sea [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023,(1):9-13,42.
- [8] 秦捷,赵文,张鹏.环境汞污染对藻类的毒性效应及其影响因素 [J]. 生物学杂志, 2011,28(3):74-76,83.
Qin J, Zhao W, Zhang P. The environment mercury pollution toxicity effect to the alga and their influencing factors [J]. Journal of Biology, 2011,28(3):74-76,83.
- [9] 陈冉冉,朱倩,赵敏,等.两种价态铬(III,VI)对真核酵母细胞谷胱甘肽水平影响 [J]. 工业微生物, 2020,50(2):36-40.
Chen R R, Zhu Q, Zhao M, et al. Effects of two kinds of chromium(III,VI) on glutathione levels in eukaryotic yeast cells [J]. Industrial Microbiology, 2020,50(2):36-40.
- [10] 刘原源,曾威阳,陈如,等.微藻趋向运动及其靶向运输应用研究进展 [J]. 生物工程学报, 2022,38(2):578-591.
Liu S Y, Zeng W Y, Chen R, et al. Tactic movement of microalgae and its application in targeted transport: a review [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022,38(2):578-591.
- [11] 朱政.自旋运动型微藻细胞的空间自组织行为探究 [D]. 武汉:华东师范大学, 2019.

- Zhu Z. Spatial self-organized behaviors of self-spinning microalgae [D]. Wuhan: East China Normal University, 2019.
- [12] Liang Y, Zhu X, Wu Q, et al. Ciliary length sensing regulates IFT entry via changes in FLA8/KIF3B phosphorylation to control ciliary assembly [J]. *Current Biology*, 2018,28(15):2429–2435.
- [13] Feng C Y, Wei J F, Li Y J, et al. An on-chip pollutant toxicity determination based on marine microalgal swimming inhibition [J]. *Analyst*, 2016,141(5):1761–1771.
- [14] Zhao X, Lin X, Qu K, et al. Toxicity of BDE-47, BDE-99 and BDE-153 on swimming behavior of the unicellular marine microalgae *Platymonas subcordiformis* and implications for seawater quality assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019,174:408–416.
- [15] Park J, Lee H, Depuydt S, et al. Assessment of five live-cell characteristics in periphytic diatoms as a measure of copper stress [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,400:123113.
- [16] Huang L, Zhang W X, Zhou W S, et al. Behaviour, a potential bioindicator for toxicity analysis of waterborne microplastics: A review [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023,162:117044.
- [17] Wang T, Yin G F, Zhao N J. A multi-target tracking method for phytoplankton based on adaptive buffer intersection-over-union [C]//2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT). Nanjing: IEEE, 2024.
- [18] Cutler G C, Amichot M., Benelli G, et al. Hormesis and insects: Effects and interactions in agroecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,825:153899.
- [19] Rix R R, Cutler G C. Review of molecular and biochemical responses during stress induced stimulation and hormesis in insects [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,827:154085.
- [20] Agathokleous E, Kitao M, Calabrese E J. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants [J]. *Environmental Pollution*, 2019,244:332–341.
- [21] Zhang Y, Gao Q, Liu S, et al. Hormetic dose-response of halogenated organic pollutants on *Microcystis aeruginosa*: Joint toxic action and mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,829:154581.
- [22] Tang W X, He M, Chen B B, et al. Investigation of toxic effect of mercury on *Microcystis aeruginosa*: Correlation between intracellular mercury content at single cells level and algae physiological responses [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022,858(P2):159894–159894.
- [23] Du X Y, Zhou W S, Zhang W X, et al. Toxicities of three metal oxide nanoparticles to a marine microalga: Impacts on the motility and potential affecting mechanisms [J]. *Environmental Pollution*, 2021,290:118027–118027.
- [24] 夏亦雪,艾晓寒,朱飞霞,等.不同衣藻光合作用响应汞胁迫的比较研究 [J]. *水生生物学报*, 2024,48(6):1040–1050.
- Xia Y X, Ai X H, Zhu F X, et al. Comparative of photosynthesis of different *Chlamydomonas reinhardtii* in response to Mercury stress [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024,48(6):1040–1050.
- [25] 逯南南,孙韶华,宋武昌,等.基于斑马鱼行为变化的水体突发汞污染物预警技术研究 [J]. *安全与环境*, 2020,23(5):69–72,79.
- Lu N N, Sun S H, Song W C, et al. Technology of behavior-based biological warning of sudden mercury pollution in water [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020,23(5):69–72,79.
- [26] 李燕,朱琳,刘硕.铅、汞单一及联合胁迫对栅藻的生长、GSH含量及相关酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 2009,30(1):248–253.
- Li Y, Zhu L, Liu S. Individual and joint stress of lead and mercury on growth, glutathione and glutathione-related enzymes of *Scenedesmus quadricauda* [J]. *Environmental Science*, 2009,30(1):248–253.
- [27] Raj M V, Thirunavukkarasu R A, Kailasam M, et al. Acute toxicity bioassays of cadmium and mercury on the juveniles of Asian Seabass *Lates calcarifer* (Bloch) [J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013,6(4):4329–4335.

作者简介: 安莉莎(2000–),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事水质生物毒性方法。lishaan@mail.ustc.edu.cn.