

上海河流沉积物的有机提取物对 3 种细胞的毒性效应

康佳¹, 雷炳莉¹, 刘倩¹, 王学彤¹, 吴明红¹, 徐刚¹, 傅家谟^{1,2}

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 河流沉积物是众多有机污染物的最终储存库。采用索氏抽提法提取出黄浦江及支流苏州河沉积物中的有机污染物, 用 CCK-8 法检测沉积物中的有机提取物对正常人肝细胞 L02、人肝癌细胞 HepG2 以及人乳腺癌细胞 MCF-7 的细胞增殖毒性, 综合评价沉积物中有机污染物的综合毒性效应, 进而比较沉积物有机提取物对这 3 种细胞增殖毒性的差异及两条河流沉积物受有机污染物污染的情况差异。结果表明, 黄浦江与苏州河沉积物有机提取物对 MCF-7 细胞和 L02 及 HepG2 细胞表现出不同的毒性效应, 黄浦江与苏州河沉积物中的大部分样品对 L02 和 HepG2 表现出一定的促增殖效应或没有影响; 对 MCF-7 细胞, 除个别样品外, 大部分样品表现出细胞增殖毒性效应, 并且呈剂量效应及时间效应依赖关系, 其毒性大小与采样的位置存在很大关联, 这说明黄浦江及苏州河沉积物有机提取物一定程度上受到了有机污染物的污染。另外, 两条河流对 L02 和 HepG2 的促增殖效应和对 MCF-7 细胞增殖的毒性效应相当, 说明两条河流受有机污染物的污染强度接近及污染物类型相似。

关键词: 有机提取物; CCK-8 法; 细胞增殖; 毒性效应

中图分类号: X 132

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2013)04-0393-07

Comprehensive Toxicity Effects on Three Cells of Sediment Organic Extractions from Major Rivers in Shanghai

KANG Jia¹, LEI Bing-li¹, LIU Qian¹, WANG Xue-tong¹,

WU Ming-hong¹, XU Gang¹, FU Jia-mo^{1,2}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Sediments are considered a repository of many organic pollutants. In this work, organic pollutants are extracted in the sediments from Huangpu River and Suzhou Creek in Shanghai using Soxhlet. The comprehensive toxicity of the sediment organic extractions to three cell proliferations including normal liver cells L02, hepatoma cells HepG2 and human breast cancer cells MCF-7 cells using the CCK-8 assay is evaluated. Proliferation toxicity differences of the sediment organic extracts on the three cells were compared. The results showed that the sediment organic extractions of Huangpu River and Suzhou Creek exhibited different toxic effects on the three cells. For L02 and HepG2, most samples showed positive cell proliferation effect or no effect; while for MCF-7 cells, majority of the samples have different degree toxic effects on MCF-7 cell proliferation and presented dose-effect dependent and time-effect dependent relationships. Besides, the toxicity effect for MCF-7 cell proliferation had a great relevance with the location of sampling. That Huangpu River and Suzhou Creek sediments were polluted by some organic toxicity pollutants can be concluded. In addition, sediments from the two rivers showed a similar toxic effect on the proliferation of L02, HepG2 and MCF-7 cells, indicating that pollution intensity and types of organic pollutants in the two rivers are similar.

Key words: organic sediment extraction; CCK-8 assay; cell proliferation; toxicity effects

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(S30109); 上海市优秀青年基金资助项目(SHU1004)

通信作者: 雷炳莉(1979—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为环境毒理学与环境风险评价. E-mail: leibingli@126.com

工业化导致大量的有毒有机污染物进入水体,并最终分配到沉积物中,因此,沉积物是有机有毒化学物质的聚集库,有人将沉积物称为污染物的“终极沉降地”或宿体.进入沉积物中的有机污染会对底栖生物产生直接的影响,同时又可能通过二次释放进入水体,进而影响整个生态系统^[1-2].一般情况下,沉积物中污染物可以积累到很高水平,在水体环境条件相对稳定时,代表了水体的长期污染水平^[3].美国“超级基金”计划和《欧盟水框架指令》在水体沉积物污染方面已展开了大量的研究.目前对不同区域水体沉积物中污染物的环境效应以及水体沉积物质量评价已成为水质研究的重要课题^[4-5].

黄浦江是上海市最大的河流,全长 114 km,贯穿上海市,至吴淞口汇入长江,在市区段干流的长度为 82.5 km.近年来,由于两岸聚集了大量的工业企业,许多生活污水和工业废水流入江中,严重影响了黄浦江的水质.苏州河是黄浦江最大的支流,被誉为继黄浦江之后上海的第二条母亲河,沿岸人口密集,工业发达,有近百年的污水直排历史.大量生活污水或工业废水未经处理直接排入河流中,对上海市饮用水源的安全性产生了很大影响,并引起了人们的广泛关注.已有的化学分析结果表明,黄浦江和苏州河受到了酚类^[6-7]、多环芳烃类^[8]、有机氯农药类^[9]、二恶英类^[10]、麝香类^[11]和重金属类的污染^[12],且其污染物含量达到较高水平.有研究表明,水环境中的药物通过饮食暴露途径会对人体健康产生风险^[13].

目前,虽然已对黄浦江及苏州河沉积物中的有机污染物进行了大量研究,但这些研究基本上是基于化学分析的结果.化学分析虽然可以定量分析存在于环境中的某些痕量污染物(可达 ng/L, pg/L 水平),帮助我们不断发现各种新的污染物^[14],但该方法不会对环境样品中的所有污染物进行逐一的定量,也不会给出环境样品的综合毒性效应,因而不能评价水源地的安全性.离体生物毒性测试可以直接、全面地反映各种有毒物质对环境和生物的综合影响^[15],因而受到了国内外研究者的重视^[4-5,16].实验结果可反应水源地的安全性,同时结合化学分析结果可确认致毒污染物,为环境管理措施的制定提供重要依据.因此,对黄浦江流域沉积物的有机提取物进行细胞毒性研究具有重要的现实意义.

鉴于以往对黄浦江和苏州河的研究主要集中在化学分析测试上,而采用细胞进行水体沉积物的综合毒性效应评价鲜有报道.本工作应用人肝细胞 L02、人肝癌细胞 HepG2 和人类乳腺癌细胞 MCF-7 的增殖实验,评价黄浦江、苏州河沉积物有机提取物对细胞增殖的综合毒性效应,并比较沉积物有机提取物对这 3 种细胞增殖毒性的差异及两条河流沉积物受有机污染

物污染的情况差异.该研究结果在一定程度上反映了上海市主要河流受有机污染物的综合污染现状及潜在的危害.

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

在黄浦江、苏州河的重要地段和河流汇入处等地点设置采样点,同时采样点的设置兼顾了河道的疏浚情况.采样点分布如图 1 所示,具体采样点的经纬度见表 1.采集的样品还包括石润和泗塘 2 个污水处理厂的污泥.2010 年 7 月,采用不锈钢抓泥斗进行沉积物底泥样品的采集(0~20 cm),采集的底泥样品用有机溶剂预清洗的铝箔包裹后,立即运到实验室,在 -20 °C 低温保存待测.

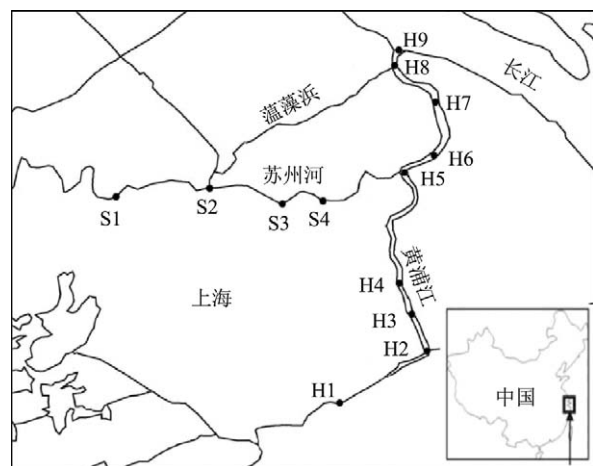


图 1 样本采样点的分布

Fig. 1 Schematic illustration of sampling sites distribution

表 1 样本采样点的经纬度

Table 1 Longitude and latitude of sampling sites

水域	采样点	纬度	经度
黄浦江	H1	30°58'44.95"N	121°21'5.60"E
	H2	31°1'13.84"N	121°29'13.91"E
	H3	31°3'54.63"N	121°28'9.07"E
	H4	31°6'18.53"N	121°27'39.86"E
	H5	31°14'42.41"N	121°29'9.55"E
	H6	31°15'24.76"N	121°32'14.06"E
	H7	31°19'14.93"N	121°33'17.40"E
	H8	31°22'20.44"N	121°29'41.76"E
	H9	31°23'23.36"N	121°30'29.79"E
苏州河	S1	31°16'15.23"N	121°4'23.37"E
	S2	31°16'35.37"N	121°10'29.21"E
	S3	31°13'52.25"N	121°18'58.65"E
	S4	31°13'25.02"N	121°22'0.67"E

样品经冷冻干燥,研磨过筛,准确称取20 g沉积物样品,用200 mL丙酮/正己烷混合溶剂(体积比为1:1)索氏提取48 h,提取前加入新鲜活化铜片和无水硫酸钠;对有机提取液进行旋转蒸发、氮吹浓缩至0.2 mL,二甲亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO)溶剂置换;最后,用DMSO定容至0.5 mL于EP管中,并将它作为原始溶液1.在上述溶液的基础上进行梯度稀释,稀释1倍定为0.5;再次稀释1倍,定为0.25.因此,1, 0.5, 0.25作为染毒前样品的3个备用浓度,它们对细胞的暴露浓度按96孔板中每孔加入的有机提取物的体积所对应的沉积物的量分别折算为4, 2, 1 mg.由于S4、石润和泗塘3个点的样品难以氮吹至指定体积,故取部分体积进行定容换算,其所对应的沉积物的量: S4点和石润点为0.4, 0.2, 0.1 mg, 而泗塘点为0.3, 0.15, 0.075 mg.

1.2 实验材料

细胞L02和HepG2由上海市中山医院赠送;人类乳腺癌细胞MCF-7, ATCC®;含酚红的不完全1640培养基, Hyclone;无酚红不完全1640培养基, Gibco; DMEM (dulbecco's modified eagle medium) 培养基, Gibco;胎牛血清(FBS), Hyclone; CCK-8试剂盒, 购自上海同仁化学公司;其他试剂均为国产分析纯, 实验室用水为经过高压灭菌处理后的超纯水.

CKX41型倒置式生物显微镜(Olympus, 日本), KA-1000型台式离心机(安亭科学仪器厂, 上海), 680型酶联免疫检测仪(BIO RAD公司, 美国), CO₂恒温细胞培养箱(LINGDE公司, 德国), Alpha2-4冷冻干燥机(Christ公司, 德国).

1.3 细胞培养与传代

HepG2, L02细胞使用DMEM与10%的胎牛血清, MCF-7细胞需用含酚红的1640培养基和10%胎牛血清混合配成细胞培养液.

实验中均采用10代以内培养的细胞, 其中传代培养细胞过程为: 当细胞形态达到80%时, 用2 mL D-HANKS清洗, 并加入1 mL胰酶消化; 吸掉消化液后, 用2 mL带血清培养基轻轻吹掉细胞, 收集到10 mL玻璃离心管中, 在1 000 r/min离心4 min, 弃去上清液后, 加入新鲜培养基混悬沉淀细胞; 最后, 加入到培养瓶中, 在37 °C, 5% CO₂, 90%的饱和湿度培养箱中培养.

1.4 CCK-8细胞增殖实验

取处于对数生长期的细胞HepG2, L02和MCF-7细胞用胰酶消化离心收集后, 加入新鲜培养基稀释; 最后, 以3 000个细胞/孔的密度种于96孔板中, 待贴壁(12~24 h)后, 加入用培养基稀释1 000倍的样品, 这样保证了最终DMSO的浓度为100%.

每个取样点染毒浓度换算到每个孔暴露的沉积物量分别为4, 2, 1 mg, 而3个取样点样品3个浓度的每孔暴露量分别为S4(0.4, 0.2, 0.1 mg), 泗塘(0.3, 0.15, 0.075 mg), 石润(0.4, 0.2, 0.1 mg). 平行样设置为3个, 以DMSO作空白对照. L02和HepG2细胞的染毒时间设为24, 48, 60和72 h, 而MCF-7细胞的染毒时间设为24, 48和72 h. 染毒结束后, 加入含有10%的CCK-8的新鲜培养基, 再放入孵箱中1 h; 然后在酶标仪上450 nm处测其吸光度值, 结果以存活率($A_{\text{样品}}/A_{\text{DMSO}}$)来表示. 测定环境样品染毒24, 48, 60和72 h后细胞的存活率.

2 结果与讨论

2.1 对HepG2细胞增殖的影响

总体来说, 苏州河和黄浦江段的沉积物样品对HepG2细胞的毒性较低, 大部分样点对细胞的增殖表现出了弱促增殖效应(见图2). 但个别样品如苏州河的S4和2个污水处理厂在低剂量时表现促增殖效应, 而在高剂量时表现出细胞毒性效应, 并呈现出明显的时间效应依赖关系, 即时间越长其对细胞的增殖毒性越大. 这可能是由于石润和泗塘是污泥样品, 而S4位于污水排放口, 其污染物种类多、浓度大^[6], 导致其对HepG2细胞产生一定的毒性效应. 具体来说, 在黄浦江上游H1和H2采样点对HepG2细胞的促增殖效应较弱, 其增殖比率低于1.2. 这两个采样点处于黄浦江的上游, 是上海市饮用水的源头, 接受污水排放较少^[6], 因此其毒性也较小. 黄浦江采样点H7, H8, H9和苏州河采样点S1, S2, S3对HepG2细胞的生长在短时间内表现出促增殖效应, 而随着时间的延长, 促增殖效应呈下降趋势, 呈现明显的时间效应依赖关系, 即在染毒时间为72 h时, 几乎对细胞增殖没有影响. 这些采样点基本上位于市区中心或是河流交汇处和污水排放口, 受到了不同程度的有机污染物的污染. 然而, H4, H5和H6虽然位于市区中心, 但它们在剂量范围和不同的暴露时间段对细胞的增殖效应几乎没有影响的. H3在低浓度1 mg/孔和2 mg/孔时表现出微弱的促增殖效应, 在高浓度4 mg/孔时却又表现出明显抑制细胞增殖效应.

2.2 对L02细胞增殖的影响

黄浦江及苏州河沉积物样品对L02细胞也基本上表现出促增殖的效应(见图3). 与HepG2细胞实验结果较为类似, S4、石润和泗塘对L02细胞的增殖表现出了毒性效应, 并呈明显的时间效应依赖关系, 随着时间的推移, 其对细胞的增殖毒性增大, 但剂量效应关系不明显. H1, H2, H3, H4对细胞表现出促增殖效应, 并呈时间效应依赖关系, 与HepG2细胞不同的是, 随

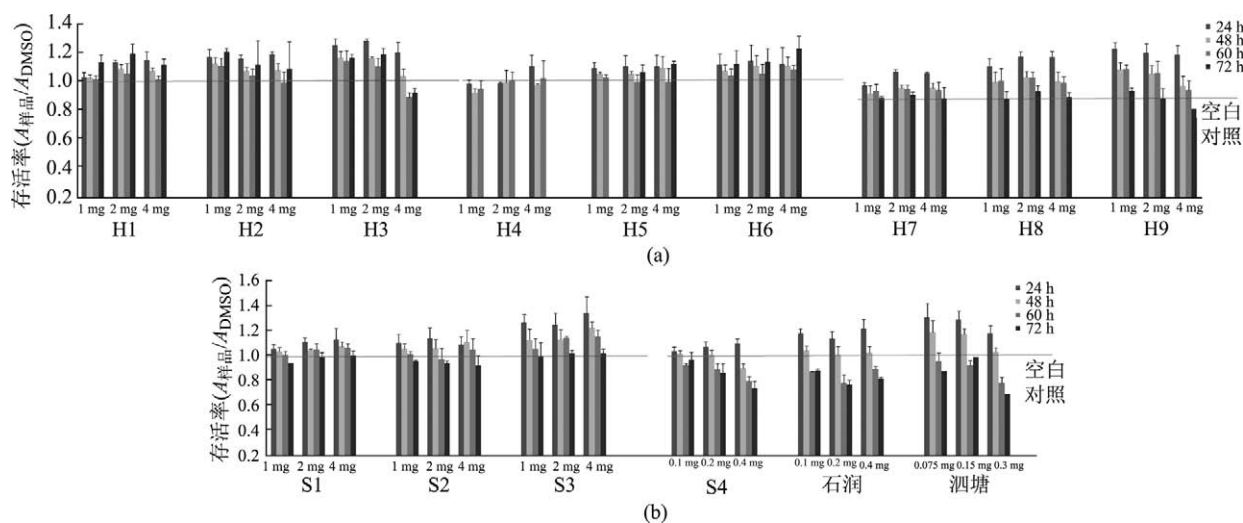


图 2 HepG2 细胞的增殖实验 CCK-8 结果

Fig. 2 CCK-8 results of HepG2 cell proliferation experiment

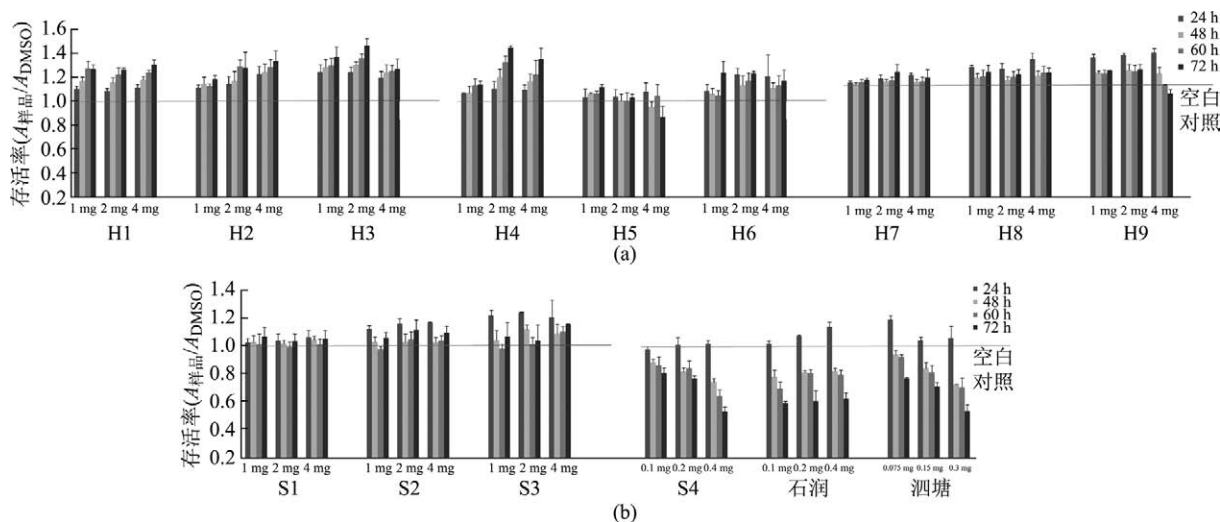


图 3 L02 细胞的增殖实验 CCK-8 结果

Fig. 3 CCK-8 results of L02 cell proliferation experiment

着暴露时间的推移, 其对细胞的增殖比率也在增加, 但并没有呈现出明显的剂量效应依赖关系. 黄浦江采样点 H5, H6, H7 和 H8 和苏州河采样点 S1, S2 和 S3 对 L02 细胞的增殖表现出微弱的促增殖效应, 但没有明显的时间效应及剂量效应依赖关系, 可能是由于这些采样点位于河道中上游, 对 L02 细胞产生毒性的有毒有机污染相对较少. H9 采样点同样对细胞表现出微弱的促增殖效应, 并在最高剂量时表现出时间效应依赖关系, 在短期暴露时表现出促增殖效应, 而长时间暴露 72 h 时, 表现出细胞毒性效应. 但整体上来说, 黄浦江和苏州河沉积物有机提取物对 L02 细胞的毒性效应较低.

2.3 对 MCF-7 细胞增殖的影响

黄浦江和苏州河沉积物及污水处理厂的两个污泥

样点的有机提取物对 MCF-7 细胞的毒性效应如图 4 所示. 可以看出, 黄浦江样 H1 对细胞增殖没有明显的影响, H1 处于黄浦江上游, 是上海市饮用水源头, 接受污水排放较少^[6], 因此其毒性也较小. H2 和 H4 表现为低浓度 (1 mg/孔) 时, 对 MCF-7 细胞增殖影响小, 而高浓度 2 mg/孔和 4 mg/孔时, 表现出细胞毒性, 且随着浓度的增大, 其毒性也增大. 这两个采样点位于其他支流流入黄浦江的交汇处, 受其他支流有机污染物的影响, 故表现出一定的毒性效应. H3 表现为低浓度促增殖效应, 而高浓度时表现出抑制细胞增殖, 该采样点处于工业区附近, 工业废水排放中含有各种环境雌激素物质, 如壬基酚 (NP)、辛基酚 (OP)、双酚 A (BPA) 等具有雌激素效应的物质^[6]. 它们在低浓度时表现为促进 MCF-7 细胞增殖的作用, 在高浓度时表现

为细胞毒性. 处于市区中心的采样点 H5, H6, H7 和河口连接处的 H8 和 H9 的 3 个浓度梯度均表现出了细胞增殖毒性, 即高浓度长时间暴露时毒性更大, 如 H7(48 和 72 h), H8(48 和 72 h) 和 H9(4 mg/孔). 苏州河采样点 S1, S2 和 S3 处, 沉积物有机提取物对 MCF-7 细胞表现为长时间 48 和 72 h 暴露时的细胞毒性, 短时间 24 h 暴露时对细胞增殖没有影响; 而采样点 S4 在 24, 48 和 72 h 暴露时间段均表现为明显的毒性效应. 这可能是由于 S2 和 S3 采样点处于苏州河上游河段,

污染相对较轻, 表现为对 MCF-7 细胞毒性效应也相对较轻; 而 S1, S4 是取自污水处理厂排污口处, 污染物种类多、浓度大^[6], 因此表现出较大的细胞毒性. 取自泗塘和石润两个污水处理厂的污泥样的有机提取物对 MCF-7 细胞表现出明显的增殖毒性, 这可能是由于在污水处理过程中许多不能被生物降解的有毒有机污染物沉降到污泥中, 从而使污泥的有机提取物表现出较强的细胞毒性.

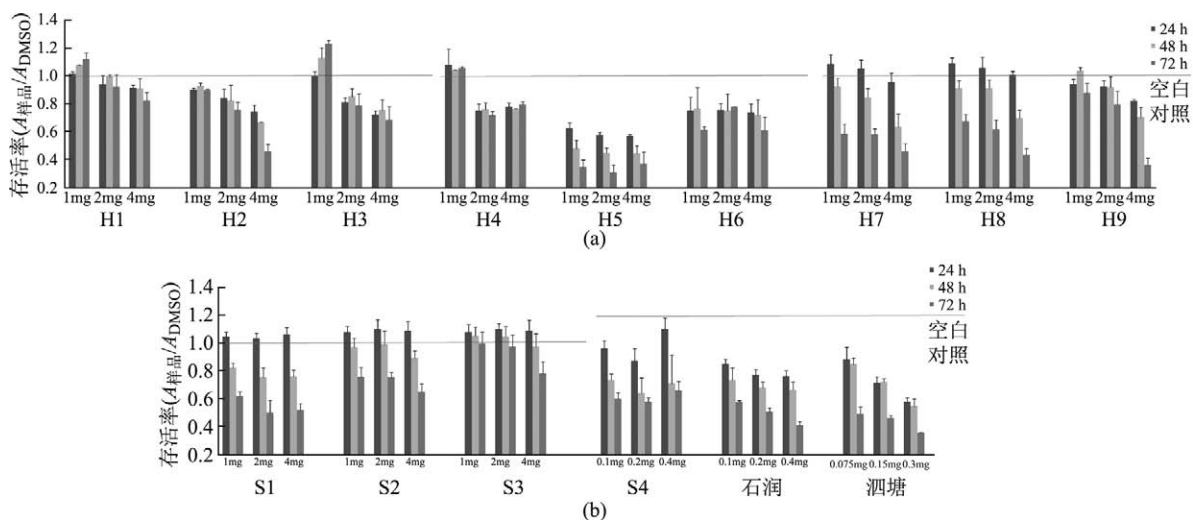


图4 MCF-7细胞的增殖实验CCK-8结果

Fig. 4 CCK-8 results of MCF-7 cell proliferation experiment

2.4 对3种细胞增殖毒性效应的比较

沉积物作为水环境的一部分, 它不但会对底栖生物的数量与种类产生影响, 而且还会不断释放污染物到上层水中, 通过食物链的传递, 进而影响整个水体生态环境. 国外很多国家学者如 Avocet^[17]已经开发了本国的沉积物环境质量标准, 我国也有学者一直致力于建立我国切实可行的水体沉积物环境质量基准^[18], 而环境质量基准与标准的研究均离不开对环境样品的生物毒性测试.

黄浦江及其支流苏州河受到了较严重的有毒有机及重金属的污染, 其污染物种类多, 来源复杂. 早在1993年就有学者利用污染底泥的释放与耗氧模式对苏州河进行评估, 发现整条河流已受到不同程度的污染, 在某些区段甚至达到重污染级别^[19]. 李洋等^[20]利用气相色谱-质谱(gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)对苏州河底泥中3种环境内分泌干扰物进行了检测和评估, 发现除苏州河江苏吴家港桥段外, 其他河段均存在潜在的生态毒害风险. 对黄浦江及苏州河样品的综合毒性评估还比较少见, 本工作利用3种细胞分别对几乎整条河流多个采样点进行了评

估, 发现沉积物对细胞 HepG2, L02 和 MCF-7 细胞增殖影响不尽相同, 各个采样点对同一细胞增殖毒性效应也不同, 同时与暴露时间也有很大关系; 但2个污水处理厂和污水排放口 S4 对3种受试细胞均表现出较强的细胞增殖毒性效应, 并且呈现明显的时间效应依赖关系. 这可能是由于污水处理厂处理水来源比较复杂, 包括城市生活废水和工业废水等, 由此造成了污泥或污水排放口处含有的有机污染物种类多、浓度大^[6,8], 导致其对3种细胞的增殖毒性也较大.

具体地说, 黄浦江及苏州河沉积物有机提取物对人肝癌细胞 HepG2 和正常人肝细胞 L02 的增殖效应影响不大, 并且较为相似. 除个别的采样点如污水处理厂污泥和污水排放口处的采样点对细胞产生了细胞增殖毒性, 其他各采样点则表现出对 L02 和 HepG2 细胞的促增殖效应, 并且效应的强弱与采样点的分布位置没有明显的关系. 与 L02 和 HepG2 细胞相比, MCF-7 细胞对黄浦江和苏州河沉积物的有机提取物较为敏感. 大部分沉积物有机提取物对 MCF-7 细胞增殖表现出较强的毒性效应, 并呈浓度和时间依赖关系, 即随着浓度的增大和暴露时间的延长, 其对细胞的增殖毒

性也增大;并且与采样点的分布位置有明显的关联,即在工业区、市区、河流交汇处、污水排放口污染较为严重的采样点,其对MCF-7细胞的增殖毒性较大,并且这两条河流对MCF-7表现出的毒性效应相当.个别采样点表现出了对MCF-7细胞的促增殖效应,可能是由于这些采样点中的雌激素类化合物对细胞表现出了促增殖效应,化学分析显示黄浦江和苏州河受到了BPA, NP等具有雌激素活性化合物的污染物^[6].当这类化合物在沉积物有机提取物中含量适当的时候就会表现出对MCF-7细胞的促增殖效应;而当其他有毒有机物含量较高掩盖了雌激素类化合物对MCF-7的促增殖效应的时候,则沉积物有机提取物对MCF-7细胞的整体效应则表现为细胞毒性效应.丁国武等^[5]研究发现黄河兰州段河水有机萃取成分对MCF-7细胞暴露48 h后,细胞表现出明显的死亡现象,并且细胞内的 $[Ca^{2+}]$ 浓度水平显著提高.牛菲等^[4]对松花江水源水中有机提取物对MCF-7细胞增殖的研究中发现,随着有机提取物浓度的升高, MCF-7细胞增殖效应呈现先升高后下降趋势,但所有采样点的不同浓度梯度均明显表现出对MCF-7细胞增殖的促进作用,显示出雌激素活性.此外,刘克明等^[21]研究发现,天津市某再生水厂各处单元水体及最终出水均对MCF-7细胞增殖表现出促增殖效应,并体现出一定的雌激素效应.上述这些研究结果与本工作的研究结果具有一定的可比性.黄浦江及苏州河各采样点沉积物有机提取物对MCF-7细胞的增殖毒性研究表明,在工业区附近、排污口、人口密集的市区及河流交汇处等受污染较为严重的采样点,有机提取物会对细胞表现出较强的毒性效应,而在其他区域内,如源头水或河流的上游地区的采样点的有机提取物对细胞的毒性较小或没有表现出毒性效应.

由此可发现, MCF-7细胞对沉积物有机提取物的增殖毒性效应更灵敏,而L02细胞和HepG2细胞则相对较弱.这说明细胞系不同,其对沉积物有机提取物的毒性效应的敏感性也不同,并且可能会表现出不同的毒性效应类型,其中具体的机制机理需要进一步的生理生化指标来进行确定.

3 结束语

对实际环境样品的MCF-7、L02和HepG2细胞增殖毒性实验结果表明,整体上黄浦江和苏州河沉积物有机提取物对L02细胞和HepG2细胞表现出了一定的促增殖效应;而对MCF-7细胞则表现了增殖毒性效应.这说明黄浦江、苏州河沉积物受到了有毒有机物污染物一定程度的污染,但是具体是受到哪类污染物污染,还需要进行进一步的化学分析.

参考文献:

- [1] PERIRA W E, DOMAGALSI J L, HOSTETTLER F D, et al. Occurrence and accumulation of pesticides and organic contaminants in river sediment, water and clam tissues from the San Joaquin river and tributaries, California [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(2): 172-180.
- [2] HONG H, XU L, ZHANG L, et al. Environment fate and chemistry of organic pollutant in the sediment of Xiamen and Victoria Harbors [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31: 229-236.
- [3] Strategic Environmental Research and Development Program. SERDP and ESTCP Expert Panel Workshop on research and development needs for understanding and assessing the bioavailability of contaminants in soils and sediment [R]. SERDP and ESTCP Expert Panel Workshop on Research, USA. Workshop Report, November, 2008.
- [4] 牛菲, 安娜, 李慧岩, 等. 松花江水源水中有机提取物诱导MCF-7细胞增殖的研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2010, 27(6): 482-484.
- [5] 丁国武, 魏延萍, 牛静萍, 等. 黄河兰州段水体中有机污染物对MCF-7细胞凋亡的影响及其机制 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(2): 91-96.
- [6] WU M H, WANG L, XU G, et al. Seasonal and spatial distribution of 4-tert -octylphenol, 4-nonylphenol and bisphenol A in the Huangpu River and its tributaries, Shanghai, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 12: 2779-2785.
- [7] 吴明红, 李刚, 徐刚, 等. 上海市河流表层沉积物中的氯酚、溴酚及多环芳烃 [J]. *环境化学*, 2012, 31(11): 1750-1758.
- [8] 董煜, 邹联沛, 钱光人, 等. 苏州河上海市区段表层沉积物中多环芳烃的分布及特征 [J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(4): 312-315.
- [9] 邓涛, 申一尘, 王绍祥, 等. 黄浦江原水中阿特拉津农药类微污染预警研究 [J]. *给水排水*, 2009, 35(11): 32-36.
- [10] 李康, 戎志毅, 贾丽娟, 等. 苏州河沉积物中的PCDD/Fs研究 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(9): 55-60.
- [11] 曾祥英, 张晓岚, 钱光人, 等. 苏州河沉积物中多环麝香分布特点的初步研究 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 180-184.
- [12] 魏荣菲, 庄舜尧, 杨浩, 等. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 527-537.
- [13] CUNNINGHAM V, BINKS S P, OLSON M I. Human health risk assessment from the presence of huaman

- pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2009, 53: 39-45.
- [14] RICHARDSON S D, TERNES T A. Water analysis: emerging contaminants and current issues [J]. *Analytical Chemistry*, 2005, 77(12): 3807-3838.
- [15] 景欣悦, 康维钧, 张宏伟. 环境污染物的生物测试方法 [J]. *国外医学卫生学分册*, 2005, 32(3): 167-170.
- [16] LUO J P, LEI B L, MA M, et al. Identification of estrogen receptor agonists in sediments from Wenyu River, Beijing, China [J]. *Water Research*, 2011, 45(13): 3908-3914.
- [17] AVOCET C. Development of fresh water sediment quality values for use in Washington State. Phase II Report: Development and recommendations of SQVs For fresh water sediments in Washington State [R]. Prepared for Washington Department of Ecology. Publication No. 03-09-088, 2003.
- [18] 陈云增, 杨浩, 张振克. 淡水沉积物环境质量基准差异分析 [J]. *湖泊科学*, 2005, 17(3): 193-201.
- [19] 方宇翹, 漆德瑶. 苏州河的污染底泥评价 [J]. *上海环境科学*, 1993(12): 27-30.
- [20] 李洋, 胡雪峰, 王效举, 等. 苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 [J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 239-246.
- [21] 刘克明, 周蕾, 王春花, 等. 再生水有机提取物雌激素效应研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2005, 22(3): 174-176.