

文章编号: 1001-5914(2007)05-0363-04

饮用水及相关材料的安全评价技术

石艳玲, 郑广宏, 王磊, 周琪

摘要: 饮用水中化学物质逐渐增多, 对人体健康和生态环境造成了日益严重的危害, 因此, 其安全评价具有重要意义。由于饮用水中化学物质具有种类繁多, 浓度极低的特点, 单一的理化指标无法反映水体中各类物质的协同效应。传统的生物试验法, 如鱼类试验和蚤类试验, 因灵敏度较低, 达不到检测痕量化学物质的要求。近年来兴起的一些基于分子水平和细胞水平的方法, 如发光细菌法和遗传毒性法, 被广泛用于饮用水及相关材料(浸泡液)毒性物质的检测, 但存在一定的问题。笔者系统地介绍了现有饮用水及相关材料安全评价技术的原理、过程和应用, 分析了各种检测方法的优点和不足, 提出发展依据细胞形态变化的 Vero 细胞培养法, 以建立一种广谱、可靠、灵敏、简单易行的综合测试技术。

关键词: 水; 水污染物, 化学性; 安全评价

中图分类号: R123.5

文献标识码: A

Safety Evaluation of Drinking Water and the Related Products SHI Yan-ling, ZHENG Guang-hong, WANG Lei, et al. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: An increasing number of chemicals were found in drinking water recent years which gradually produce the adverse effects on human health and the environment. Therefore, safety evaluation plays an important role in the process. The advance in safety evaluation of drinking water and products for use in contact with water (their lixivium), introducing their principles, procedures and practical applications, were systematically reviewed in this paper. Comparison analysis was made to indicate the advantages and problems of the existing methods, to suggest a broad-spectrum, reliable, sensitive and applicable method for safety evaluation of drinking water in the future.

Key words: Water; Water pollutants, chemicals; Safety evaluation

随着工业化进程的加速, 新的化学物质和人工合成材料日益增多。化学物质在生产、运输和使用过程中将不可避免地进入饮用水源, 而各种新材料在饮用水行业的使用(如容器、连接器、管道等)也可能造成其中微量化学物质的溶出, 这些因素造成目前饮用水中化学物质种类不断增多。有报道指出, 目前饮用水中可检出的有机污染物达 2 221 种^[1], 其中, 许多具有“三致”(致癌、致畸和致突变)作用, 对人体健康造成严重威胁。因此, 饮用水的安全评价对人类健康具有重要意义。就目前的发展状况而言, 饮用水的安全评价技术主要可分为理化指标分析法和生物毒性评价法。由于饮用水中的化学物质通常浓度极低(一般为 $\mu\text{g/L}$ - ng/L 级)^[2], 因此, 对检测手段和分析方法提出了很高的要

求。尽管仪器法的发展使饮用水中微量物质的检测变得更加方便、快速, 但检测成本偏高, 并且由于水中各种化学物质之间的协同作用, 单一的理化指标无法反映饮用水的综合毒性。传统的生物试验法(如鱼类、藻类试验法)可以检测水体的长期和综合毒性, 但其灵敏度较低、所需时间长, 不适于饮用水的安全评价。从 20 世纪 80 年代以来, 随着现代生物技术的快速发展, 生物体(特别是微生物)中一些分子与细胞水平的变化被用作衡量水体安全的指标, 并以此为基础建立了一些快速、灵敏的检测和评价水体生物毒性的技术。笔者系统地介绍了相关评价技术的原理与过程, 分析了各种方法的优点与存在的问题, 并提出了饮用水及其相关材料综合安全评价的发展方向。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20677043); 上海市自然科学基金资助项目(05ZR14119)

作者单位: 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化国家重点实验室(上海 200092)

作者简介: 石艳玲(1983-), 女, 硕士研究生, 从事水污染控制研究。

通讯作者: 王磊, Tel: (021) 65981831; E-mail: celwang@yahoo.com

1 理化指标分析法

1.1 单一指标法

单一指标法是通过物理、化学及仪器的方法来检测饮用水中存在的各种化学物质, 当检测出的某类化学污染物的浓度超过规定的阈值时, 可根据其超出量的多少来评价水体是否对人

NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52, National Oceanic and Atmospheric Administration, 175 pp+ appendices, 1991.

[25] CCME. Protocol for the derivation of Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life S). Canadian Environment Quality Guidelines. CCME, 1999, EPC-98E.

[26] USEPA. Chicago: Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Hyalalella azteca* and the midge *Chironomus riparius* S). EPA 905-R96-008, Great Lakes National Program Office, Region V, 1996.

[27] Macdonald DD, Ingersoll CG, Berger TA. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater

ecosystems J). Arch Environ Contam Toxicol, 2000, 39:20-31.

[28] 麦碧娟, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲沉积物中有害有机物的污染现状及评价 J). 环境科学研究, 2001, 14(1):19-23.

[29] 袁旭音, 王禹, 陈骏, 等. 太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估 J). 环境科学, 2003, 24(1):121-125.

[30] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 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.

[31] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价 J). 中国环境科学, 2003, 23(5): 521-525.

(收稿日期: 2007-01-31)

体有影响或危害,及危害作用的大小。而阈值一般通过流行病学或毒理学的方法确定。因此,单一指标法依赖于分析技术和医学、毒理学的发展。近年来,由于各种色谱新技术的出现和质谱-质谱联用分析技术的发展,能同时对污染物进行分离、定性和定量检测^[3],单一指标法成为各国评价饮用水安全所采用的主要方法。

随着饮用水中可检测到的化学物质日益增多,对每种具体污染物制定相应的标准检测方法和独立评价方法不仅费时、费力,而且由于多种化学物质之间存在加合、协同等作用,即使每种化学物质都在其安全浓度范围内,也可能对人体健康造成危害。为此,美国环境保护署(EPA)提出了多污染物分析方法。

1.2 EPA 多污染物分析方法

1985 年, EPA 提出多污染物分析方法,用以评价自来水中有机污染物对人体健康的危害程度。这种方法需要收集大量文献及试验数据,分别制订多种化合物的标准值,从而为评价各种污染物的综合影响提供统一依据。

该方法本质上是一种等标负荷法,它假设污染物的危害程度与其浓度呈线性关系,所有化合物只要环境影响度(AS)相同,则对人体和生态环境的潜在危害也相同。环境影响度是水样中污染物的实际浓度与水环境的环境目标值(AMEG)之比,包括人体健康影响度(AS₁)和生态环境影响度(AS₂)。当某种污染物的 AS₁ 和 AS₂ 值大于 1 时,表明该污染物对人体健康和生态环境均有影响,其数值越大,影响越严重。并假设各种化合物的效应可以加合,用总影响度 TAS₁ 和 TAS₂ 来评价水环境中多种污染物的综合影响。

和单一指标法相比,多污染物的分析及其评价方法能较为全面、科学地揭示饮用水及相关材料中的化学物质是否对人体和生态环境造成潜在的危害,但综合影响不能表现为各类物质毒性的简单加合。因此,需要建立一种能够直接评价饮用水及相关材料对人体和生态环境的综合影响的标准方法来代替对具体污染物的分析。而综合毒性测试正是一种可以快速地对饮用水安全做出评价的方法^[4]。

2 生物毒性检测法

生物毒性评价是指将对毒物敏感的生物体暴露在一定剂量的污染物下,观察生物体活动、行为的变化,以及组织、器官、细胞和分子水平的异常。饮用水(源)中化学物质的特点是种类繁多、浓度较低,有害物质的毒理学效应多为慢性危害,并且常常联合作用于人体。因此,生物毒性检测法可以作为一种有效的综合评价手段。

2.1 水生生物法

鱼类是最常用的水质监测生物。试验过程中,通过随时观察鱼的中毒症状,并记录其行为、生理、生化特点(如丧失平衡、游泳行为不正常、呼吸变化、体色变化及酶活力和肝细胞的糖肽变化等)来掌握水体的污染状况。为了寻找更灵敏的生物监测方法,近年来,生物学工作者提出利用鱼类回避试验来监测水质^[5]。这一方法属毒理学研究范畴,污染引起的生物回避,可使水环境中的水生生物种类、区系分布随之改变,从而打破了生理系统的平衡。利用生物的这种反应进行生物监测,可以检出较低浓度的污染物。

用鱼类的生理、生化指标进行水质监测具有操作简便、经济等优点,已广泛地应用于水体污染和污水处理厂的出水监测。王

丽萍等^[6]通过鱼类影响试验证明,污水处理厂出水对鱼类的毒性主要是由水中的游离氨引起的。但鱼类由于来源、饲养条件等的不同,对受试物的敏感性、反应一致性有很大差别,这影响了试验结果的准确性和可重复性。又由于其灵敏度达不到饮用水水质的检测要求,因此,一般不用于饮用水的安全评价。

蚤类对许多毒物(特别是重金属)比鱼类更敏感。当工业废水排入水体时,常常先引起蚤类死亡。蚤类还有分布广、繁殖力强、生活周期短、容易培养等特点,因此,是很好的水质监测试验材料。任宗明等^[7]通过测试饮用水中余氯对大型蚤的急性和慢性毒性,来研究余氯对在线监测的水生生物的毒性效应。但目前,尚缺乏对综合毒性研究方面的报道。

2.2 微生物毒性检测法

化学污染物的微生物毒性与鱼类毒性乃至人体毒性之间存在某种程度上的关联,因而可以用微生物毒性试验来代替其他毒性试验。微生物毒性试验的一个突出优点是费用十分低廉;其次,微生物体通常由少数细胞组成(如细菌为单细胞),故其毒性效应比较迅速,试验时间可比常规鱼类毒性试验缩短几倍乃至几千倍^[8]。目前,应用最广泛的微生物毒性法有藻类毒性试验和淡水发光细菌法。

低等藻类为单细胞,体积小、生命周期短,对外界环境条件的变化反应较灵敏。在环境监测工作中,常将特定的敏感藻类接种于含有某种化学受试物的培养基中培养,然后通过测定藻细胞的生长及其叶绿素含量的变化情况,以评价环境污染物的毒性。Giancarlo 等^[9]用 *Pseudokirchneriella subcapitata*(以前称为 *Selenastrum capricornutum*) 监测意大利托斯卡纳区域的大面积的水体,以评价地表水和地下水对藻类生长的影响以及水体中发现的每种杀虫剂对藻类的毒性作用,进而考察杀虫剂对水体生态环境的危害性。结果表明,地表水和地下水的部分水样对藻类有毒害作用。藻类指示物可以在地下水水质监测中作为一种敏感的筛选工具。而在地表水中,由于富营养化的问题,有毒物对藻类的抑制作用被掩盖。这表明,藻类毒性试验具有较高的灵敏度,可用于饮用水的安全评价。

发光细菌法用于环境毒物的检测开始于 20 世纪 70 年代末,由于其检测速度快、灵敏度高、设备简单以及具有极好的可扩展性,在环境样品的毒性检测中得到了快速的发展。我国于 1995 年将这一方法列为环境生物毒性检测的标准方法(GB/T 15441—1995《水质急性毒性的测定 发光细菌法》^[10])。

发光细菌法的原理是利用灵敏的光电测量系统测定毒物对发光细菌发光强度的影响。发光细菌体内含有荧光素、荧光酶、三磷酸腺苷(ATP)等发光要素,在有氧条件下,通过细胞内的生化反应产生微弱的荧光。当细胞活性升高(处于积极分裂状态)时,其 ATP 含量高,发光强度增强。在毒物作用下,细胞活性下降,ATP 含量水平下降,发光强度降低。有实验显示,毒物浓度与菌体发光强度呈线性负相关关系,因此,可以根据发光强度判断毒物毒性的大小,用发光度表征毒物所在环境的急性毒性^[11]。有研究表明,有毒的化学物质、重金属离子、抗生素、化学治疗剂、农药等都会影响细菌发光,故采用发光细菌作为敏感的指标物测定有毒有害物是可行的^[12]。

20 世纪 80 年代,美国 SDI 生物技术公司(Strategic Diagnostics Inc.)拥有了基于发光细菌法和生物传感技术的 Microtox[®] 毒性检测系统。该系统在很多国家被用来检测饮用水供水系统。对于因为事故或故意破坏造成的污染,毒性测试可以在 15 min 内

快速展现饮用水毒性的任何变化,保障监督机构对水质变化做出快速反应;也可以对饮用水中的慢性毒性物质进行监测,提供一种全面保障供水安全与卫生的有效方法,是目前世界上唯一适合饮用水卫生检测的系统。

值得注意的是,发光细菌和人类的同源性较低,其检测结果有时难以直接反映水体对人类的危害程度。

2.3 遗传毒性检测法

饮用水中含有多种致癌、致突变的物质。有学者认为,对于人体健康和人口素质的影响而言,水源中是否含有遗传毒性物质是评价水源水质的主要指标^[13]。有人提出致畸变潜力(mutagen formation potential, MFP)的概念,来表征污染物的遗传毒性^[14]。

对于水体有机物污染的遗传毒性评估,一般都采用体外短期生物测试系统进行,如 Ames 试验、SOS 试验、微核试验及彗星试验。

2.3.1 Ames 试验 Ames 试验是一种检测环境中致突变物的测试方法,其原理为利用鼠伤寒沙门菌(*Salmonella typhimurium*)的组氨酸营养缺陷型菌株发生回复突变的特性来检测被检物质是否具有致突变性^[15]。

Ames 试验的准确性和灵敏度都很高,所需样品的量极少,因此应用广泛。肖贤明等^[16]通过比较某城市水源水、自来水及经不同组合工艺净化水的 Ames 试验结果,得出致突变性与水中某些有机污染指标直接相关。近年来,有人研究出一种液体微量滴定改进的 Ames 试验,称为 Ames II 试验。Flückiger 等^[17]用 Ames II 测试了 19 种化学物质的致突变作用,结果表明,与传统的 Ames 试验相比,Ames II 试验对诱变剂更为敏感,试验结果的可重复性更好。

不过,由于 Ames 试验所用的试验菌属于原核生物,用它得出的结论来推断受试物对真核生物的致突变(致癌变)作用并不完全适合。

2.3.2 SOS 显色法 SOS 显色法是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新的遗传毒性检测方法,其原理是:在 DNA 分子受到由外因引起的大范围损伤、其复制又受到抑制的情况下,会导致一种容易发生错误的修复。所有这些在遗传毒物处理后的大肠杆菌中出现的一系列反应统称为 SOS 应答。SOS 显色法相对于 Ames 法更为快速、简便、灵敏和准确。因此,已引起人们的密切关注,成为一种值得推广的水质监测评价方法^[18]。

高蔚等^[19]用 SOS 显色试验检测了某市 3 家不同水源水厂末梢水的遗传毒性,发现 3 家水源水厂的末梢水都受到了不同程度的遗传毒性污染,其遗传毒性由氯化消毒引起;同时,做了 Ames 试验,并与 SOS 显色试验结果进行比较,认为在检测饮用水的遗传毒性方面,后者更简单、可靠。

2.3.3 微核试验 微核的形成是细胞受诱变剂作用后的一种遗传学终点。以观察细胞中微核的形成来检测“三致”效应,称为微核试验^[20]。目前,应用最多的微核试验是紫露草微核试验(*tradescantia paludosa* MCN test)和蚕豆根尖细胞微核试验(*Vicia faba* MCN test)。

陈壁锋等^[21]采用蚕豆根尖微核试验和紫露草微核试验对深圳蛇口工业区生活饮用水的遗传毒性进行测试,结果与 Ames 试验结果一致。

2.3.4 彗星试验 彗星试验也称单细胞凝胶电泳(SCGE),是一种快速、简便、灵敏地检测单个细胞 DNA 断裂的技术。近年来,由于其对检测低浓度遗传毒物具有高度灵敏性,在环境监测,尤

其是水源水和饮用水安全评价方面得到广泛的应用。

陈海刚等^[22]采用人外周血淋巴细胞彗星试验和小鼠睾丸细胞彗星试验研究了不同水样对不同生物靶位的遗传毒性,结果表明,两种彗星试验在检测水源水有机浓缩物遗传毒性方面具有良好的应用前景。

以上几种遗传毒性检测方法均可以有效地测定饮用水中的“三致”物质。但通常情况下,只有对受测水样进行浓缩后才能检测,因此,在检测的灵敏度方面有待进一步提高。此外,对于不具有“三致”效应的有害物质,遗传毒性检测方法无法评价其生物毒性。

2.4 细胞毒性检测法

细胞毒性检测法是一种在离体状态下模拟生物体生长环境,检测水体、相关材料及其浸提液对细胞溶解(细胞死亡)、抑制细胞生长和其他毒性作用的方法^[23]。该法主要用于医学器材的安全评价。由于哺乳动物细胞与人体高度同源,近年来,不断有研究者将其应用于水质监测和饮用水安全评价领域,取得了较好的成果,因而逐渐得到推广。

2.4.1 细胞增殖度法 自 20 世纪 80 年代以来,采用细胞增殖度法评价细胞毒性已广泛应用于生物安全性评价和环境安全评价中。该方法的原理是将哺乳动物细胞与含污染物的水样或材料的浸提液接触后,对存活细胞的数量进行测定,用细胞增殖率来推断水体中的污染物或材料对细胞的毒性作用。但在实际操作中,要精确计量细胞的存活数量和存活率较困难。四氮嘧啶蓝比色分析法(MTT 法)可以有效解决这一问题。

MTT 法的原理是活细胞中的线粒体脱氢酶可将 3-(4,5-二甲基噻唑-2)-2,5-二苯基四氮唑溴盐还原,产生紫色结晶物,用二甲基亚砜(DMSO)溶解,采用酶联免疫检测仪测定其吸光度。活细胞数越多,吸光度越高。通过与对照组的比较,得到实验组的细胞增殖率,从而评价受试样品的细胞毒性。彭安等^[24]用 MTT 法检测一个饮用水工艺流程各阶段有机提取物对细胞的增殖活性,考察各阶段出水对细胞的毒性。实验数据表明,经强氧化剂(高锰酸钾)处理后,水体产生的有机提取物对细胞毒性较大;而经过一系列水工艺处理后,水质有所好转。

2.4.2 原代细胞法 体外细胞培养包括传代细胞培养和原代细胞培养。有人认为,传代培养细胞的测试结果并不能完全、真实地反映环境中污染物对生物个体的生物毒性,比较而言,原代培养细胞的细胞色素 P450 1A 受环境污染诱导的动力学过程类似于其在活体中的过程^[25],且仍然保持着原有组织的基本特征及代谢系统,包含了母体化合物的生物转化过程,所以其测定结果更能真实地反映环境中污染物的生物毒性和毒理动力学过程。

王军等^[26]采用北方某自来水源的源水及其经各处理工艺的出水,固相萃取后,检测原代培养的草鱼肝细胞在萃取物诱导下的生物体内解毒系统阶段的酶(EROD)水平,结果表明,结合水样的固相萃取,通过对草鱼原代培养肝细胞 EROD 的测定能有效筛选和定量分析水样中类二英污染物。

2.4.3 Vero 细胞培养法 英国于 20 世纪 90 年代,逐步发展和完善了一种细胞毒性检测法——Vero 细胞培养法,以用于饮用水及相关材料的综合安全评价^[26]。该法的原理是利用来源于非洲绿猴肾脏的 Vero 细胞(CCL-81)在正常情况下生长时,呈不规则三角形;而在含一定浓度有害化学物质的培养基中生长时,则由三角形转变为圆形或椭圆形的特点来判断饮用水及相关材料的综合安全性(材料的安全性评价通过测定材料浸泡液的综

合生物毒性进行)。

Romero^[27]用 Vero 细胞测试氯化汞的毒性,并确定了能够检测到毒性的氯化汞的浓度范围。Fernandez^[28]采用 Vero 细胞的形态学分析和生化分析确定了五氯苯酚对哺乳动物细胞的毒性。已有研究表明,很低浓度的有害化学物质就可造成 Vero 细胞变形(高浓度造成细胞死亡或繁衍速度下降),因此,其反应灵敏度极高,而且对不同性质化学物的反应具有普遍适用性(重金属离子、极性与非极性有机物的超标都可造成细胞变形)。同时,非洲绿猴肾脏的 Vero 细胞与人体细胞高度同源,检测时间仅需 48 h^[29]。因此,该方法是一种理想的饮用水综合安全评价手段。

但是,该方法的评判是通过低倍显微镜直接观察生长细胞的形状变化进行的,缺乏一个严格的科学定量标准。在实际操作中,感性指标判断的准确性往往受到质疑(特别是污染物浓度处于临界状态下),导致该方法不能作为一个最终的评价手段,在全球范围未得到广泛推广(我国也未将该方法列为标准方法)。因此,研究化学污染物致 Vero 细胞变形的分子机制,发现该细胞变形的分子标志物,将会为建立一个评价 Vero 细胞变形的科学定量方法提供理论依据。

3 结论与展望

饮用水中化学物质种类繁多,浓度极低,仅利用污染物的浓度值来反映危害程度是不全面的,因为某些污染物质含量虽低而毒性剧烈,并且各种化学物质之间存在协同、相加、独立或拮抗作用,因此,理化指标无法反映饮用水水样真实的污染状况和危害程度。生物监测虽然能反映各种污染物的综合影响,但由于目前传统的综合生物毒性评价方法都是以水生生物个体的行为改变或器官的异常表现作为评价标准,检测灵敏度较低,反应延迟时间长,不适于饮用水的综合安全评价。长期以来,国内外有关饮用水生物毒性研究主要集中在“三致”效应方面,如用 Ames 试验、微核试验、彗星试验等。近二十年来,虽然发展了发光细菌、藻类等微生物评价方法,但其灵敏度也难以达到直接评价饮用水综合安全的要求,虽然可以通过对饮用水高度浓缩后进行测定,但误差较大,而且微生物与人类细胞的同源性较低,测试结果难以直接反映对人体健康的影响。

细胞毒性检测法通常采用哺乳动物细胞作为实验生物,与人类细胞高度同源,而且灵敏度较微生物法有所提高,尤其是 Vero 细胞培养法。由于其并非以传统的细胞死亡(生长)作为评价指标,而是以细胞变形与否作为生物毒性评价指标,因而灵敏度更高。同时,Vero 细胞对各类化学物质有普遍适用性的应激反应,是一种理想的饮用水及相关材料的安全评价方法。如果在今后的研究中能够阐明各种类型化学物造成 Vero 细胞变形的分子机制,确定受各类化学物影响的主要膜组分和应激膜蛋白,将为建立 Vero 细胞生物毒性检测的科学定量指标提供理论依据,从而使建立一种广谱、可靠、灵敏、简单易行的饮用水综合安全评价技术成为可能。

参考文献:

- [1] 顾涛,杨叶梅,朱凤鸣,等.自来水痕量有机污染物检测及致突变性研究[J].中国卫生检验杂志,2006,16(3):261-263.
- [2] 蒋金花.水体有机污染物对人体健康的影响[J].国外医学卫生学分册,2003,30(6):321-325.
- [3] 邹学贤,杨叶梅,朱凤鸣.饮用水有机污染物的检测及其健康危害

的评价[J].昆明医学院学报,1999,20(3):77-81.

- [4] William H, van der Schalie WH. Selection of a battery of rapid toxicity sensors for drinking water evaluation[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 22: 18-27.
- [5] 张志杰.环境生物监测[M].北京:冶金工业出版社,1990:179-189.
- [6] 王丽萍,张雁秋,徐正华.污水处理厂出水对鱼类影响的试验研究[J].中国矿业大学学报,2002,31(3):310-314.
- [7] 任宗明,付荣恕,王子健,等.饮用水中余氯对大型蚤的急性和慢性毒性[J].给水排水,2005,31(4):26-28.
- [8] 李建伟.污染物的微生物毒性检测方法的比较研究[J].化学世界,2005,46(7):442-445.
- [9] Giancarlo S. Surface and ground waters characterization in Tuscany (Italy) by using algal bioassay and pesticide determinations: comparative evaluation of the results and hazard assessment of the pesticides impact on primary productivity[J]. Chemosphere, 2005, 58: 571-578.
- [10] GB/T 15441—1995 水质急性毒性的测定 发光细菌法[S].
- [11] 方占强,陈中豪,胡勇有,等.发光细菌法在水质监测中的应用[J].重庆环境科学,2003,25(2):56-58.
- [12] 岳舜琳,糜晔新,陆莹.利用发光细菌检验水中有毒有害物质[J].净水技术,1992,(3):11-12.
- [13] 孙立伟,曲霓霓,李兆利,等.人外周血淋巴细胞彗星试验检测饮用水水质毒性研究[J].环境科学学报,2005,25(3):324-327.
- [14] Takanashi H, Urano K, Hano T, et al. Method for measuring mutagen formation potential (MFP) on chlorination as a new water quality index[J]. Water Research, 2001, 35: 1627-1634.
- [15] 林朝晖,方东,楼霄.Ames 试验在水质监测方面的应用[J].微生物学通报,2002,(3):66-70.
- [16] 肖贤明,林耀军,潘海祥,等.饮用水 Ames 致突变性与主要有机污染指标的关系[J].中国科学院研究生院学报,2002,19(2):125-128.
- [17] Flückiger IS, Baumeister M, Braun K, et al. Assessment of the performance of the Ames IITM assay: a collaborative study with 19 coded compounds[J]. Mutation Research, 2004, 558: 181-197.
- [18] 梅卓华,方东,楼霄.SOS 显色法测定水中遗传毒性[J].环境检测管理与技术,1997,9(3):17-18.
- [19] 高蔚,陈秀娜,李小燕.用 SOS 显色试验检测饮水中非挥发性有机物的遗传毒性[J].现代预防医学,1997,24(4):391-393.
- [20] 郑相宇,张太平,刘志强,等.水体污染物“三致”效应的生物监测研究进展[J].生态学杂志,2004,23(4):140-145.
- [21] 陈璧锋,梁丽燕,李来玉.深圳蛇口生活饮用水化学污染物分析及其致突变性研究[J].广东卫生防疫,1999,25(3):1-3.
- [22] 陈海刚,李兆利,孙立伟,等.应用两种彗星试验方法检测饮用水源水的遗传毒性[J].环境污染与防治,2005,27(2):148-150.
- [23] 黄哲玮,孙皎,孟爱英.两种体外细胞毒性检测方法的比较研究[J].上海生物医学工程,2005,26(4):205-207.
- [24] 彭安,柴文,林爱武,等.对以高锰酸钾为氧化剂的饮用水工艺流程的细胞毒性评价[J].北京师范大学学报,2004,40(6):803-808.
- [25] 王军,何文杰,马梅,等.原代培养细胞法测试水中类二 英物质[J].中国给水排水,2005,21(7):92-94.
- [26] GREAT B. The water supply(water fittings) regulations 1999, statutory instruments 1999. No.1148 (and amendments) [S]. London: The Stationery Office, 1999.
- [27] Romero D. Comparison of cytopathological changes induced by mercury chloride exposure in renal cell lines(VERO and BGM) [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2004, 17: 29-141.
- [28] Fernandez PF. Cytotoxic effects in mammalian Vero cells exposed to pentachlorophenol [J]. Toxicology, 2005, 210: 37-44.
- [29] BS 6920: Suitability of water and non-metallic products for use in contact with water intended for human consumption with regard to their effect on the quality of the water [S]. British Standards Institution, 1992.

(收稿日期:2007-01-14)

(本文编辑:韩威)