

水源水膜处理与常规处理技术的遗传毒性指标对比*

石 健^{1,2} 吴 明¹ 许志珍² 王东升²

(1. 南通大学, 江苏 南通 226007; 2. 中国科学院生态环境研究中心 国家水开放重点实验室 北京 100085)

摘要: 随着水源水微污染问题的日益突出和水质标准的不断提高, 传统的水处理技术面临严峻挑战。膜处理是目前饮用水深度处理的有效手段。选择 UMU 方法对常规工艺的出水及膜处理工艺出水进行遗传毒性评价比较。结果表明: 采用正己烷 + 二氯甲烷 + 甲醇对水样中的遗传毒性物质进行洗脱效果更为明显; 对于常规处理工艺来说, 混凝可以部分去除水源水中大分子有机物和非溶解性色度以及部分遗传毒性前体物质; 针对不同工艺段的出水, 氯化可明显增加水样的遗传毒性; 不论消毒与否, 仅从遗传毒性指标来看, 膜工艺均优于常规工艺出水, 但考虑到水样的区域特性, 膜法处理是否在遗传毒性指标方面比常规处理更有优势, 仍需进一步的资料或数据支持。

关键词: 饮用水; 遗传毒性; UMU 法; 超滤; 沉淀

DOI: 10. 13205 /j. hjgc. 201407018

COMPARISON OF THE GENOTOXICITY INDEX BETWEEN THE CONVENTIONAL TREATMENT AND MEMBRANE TREATMENT PROCESS

Shi Jian^{1,2} Wu Ming¹ Xu Zhizhen² Wang Dongsheng²

(1. Nantong University, Nantong 226007, China; 2. Key Laboratory of Environmental Water Chemistry, Ecological Environment Research Center of Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China)

Abstract: Organic compounds existed in drinking water such as POPS/EDCS are commonly considered as the main reason for genotoxicity even at ultra-trace level. The conventional treatment process cannot remove these organic compounds effectively and sometimes results in the rise of the genotoxicity of water. Membrane treatment could achieve satisfactory results on the above compounds. A UMU method to evaluate the genotoxicity of water at different stages of the conventional treatment process was developed and a comparison of the current popular membrane treatment process and the conventional process based on the UMU test was carried out. Moreover, a pre-treatment method was developed according to the water quality characteristics of a water plant in the South. The results showed that chlorination could promote the increase of the genotoxicity in water significantly. Coagulant sedimentation could help reduce the genotoxicity of water through effective removal of the organic compounds. However, taking genotoxicity index into consideration, water after the membrane treatment showed a little advantage compared with that by the conventional process.

Keywords: drinking water; genotoxicity; UMU test; ultrafiltration; sedimentation

0 引 言

由于饮用水源水的微有机污染问题日益突出, 同时也随着对消毒副产物、微生物指标和内分泌干扰物质研究的深入, 水质标准不断提升, 使得传统饮用水处理工艺颇受关注。一般来说, 传统饮用水处理工艺的重点是去除水中的悬浮物、胶体颗粒物, 而对溶解

性有机物的去除能力不足, 由此导致的消毒副产物问题使得传统处理方法在业界颇受争议, 部分常规水处理技术已经无法适应当前需求^[1-3]。

膜技术属物理方法, 简易快速, 是近年来最为热门、最具前景, 也是发展最为迅速的水处理技术之一。在饮用水处理中, 超滤(UF)法比较常见, 该法在压力驱动下, 利用多孔材料的拦截能力, 将颗粒物质从流体及溶解组分中分离出来。超滤膜使用的材料通常都是高分子聚合物, 以疏水性为主, 典型孔径在 0.01 ~

* 国家自然科学基金(21177067); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010034); 江苏省青蓝工程计划项目。

收稿日期: 2013 - 08 - 12

0.1 μm,对于细菌和大多数病毒、胶体、淤泥等具有极高的去除率^[4-8]。

为了更好地理解膜处理技术与常规水处理技术在饮用水处理的差别,了解采用不同方法对水源水进行处理后水质指标的特征,对不同处理方法出水进行水质指标的对比显得十分必要。本文选择长江中下游某城市水厂,对水源水分别用超滤法及常规法进行处理,由于在常规水质方面已有学者做过比较,故选择评价水中遗传毒性指标并采用 UMU 法进行比较。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

TA1535/PSK1002 *Salmonella typhimurium* 菌液由中科院生态环境研究中心提供, Luria-Bertani(L-B) broth(美国, DIFCO)、二甲基亚砷(ACS 级, 美国 AMRESCO) 为稀释溶剂和阴性对照, 4-nitroquinoline-1-oxide(4-NQO) 用作阳性对照以检验实验的敏感性(美国 Sigma 公司), o-nitrophenol-β-D-galactopyranoside(ONPG)(东京化成), 甲醇(HPLC 级 Fisher, Co.)。

主要设备包括酶标仪(Spectra Fluorplus, TECAN)、分光光度计(WFZUV 2000, 上海)、恒温振荡摇床(HZQF, 哈东联)、恒温平板摇床(Titramax 1000, Heidolph)、百级超净工作台(DL2CJ21F, 哈东联)、旋涡混合器(MS2, 广州 IKAWorks) 等。

1.2 实验方法

实验方法参照文献 [9-10], 方法如下: 将 TA1535/PSK1002 *Salmonella typhimurium* 菌液含氨比西林的 LB 培养基置于三角瓶中(8 层纱布封口) 在 30 °C 下振荡(160 r/min) 隔夜培养 16 h。取前培养菌液 150 μL 于三角瓶中(8 层纱布封口) 加 TGA 培养液 15 mL 稀释, 测得 A_{595} 应在 0.05 以下, 在 37 °C 下振荡(160 r/min) 培养 1.5 h(前培养); 稀释样品(标

样) 并在每个玻璃试管中加入 300 μL 前培养菌液, 封口膜封口, 在 37 °C 下振荡(160 r/min) 培养 2 h, 在样品中加入 1 mL 的 z-buffer 溶液, 50 μL SDS 溶液(用水超声溶解 SDS), 10 μL 三氯甲烷, 振荡摇匀, 培养结束后, 取 150 μL 于酶标板上测定 A_{595} , 取 100 μL 加入离心管中(中间时间越短越好) 加 200 μL ONPG 溶液(用缓冲溶液超声溶解 ONPG), 于 30 °C 下静置反应 20 min, 然后加入 500 μL Na_2CO_3 溶液终止反应, 同时取 150 μL 于酶标板上测 A_{415} 和 A_{550} 。用式(1) 计算 β2 半乳糖苷酶诱导活性:

$$y = 1000 \times A_{415} - 1175 \times A_{550} \times t \times v \times A_{595} \quad (1)$$

式中: y 为酶活性; t 为加入 ONPG 后的反应时间; v 为反应菌液的稀释倍率; A_{595} 、 A_{415} 、 A_{550} 分别为波长在 595、415、550 nm 下的吸光度值。

实验结果以 IR 值表示(IR = 样品的酶活性/阴性对照的酶活性)。当 $IR \geq 2$ 时, 表示结果呈阳性。除了用 IR 值表示遗传毒性强弱外, 利用内插法求出在 $IR = 2$ 时, 经过不同浓度梯度稀释后, 96 孔板中每孔加入的水量(即文中图 3—图 5 横坐标中的“水量”值), 也可以来表示遗传毒性高低。在 IR 值相同的情况下, 测试中加入的水量越小, 所反映的遗传毒性越强, 从而可以比较各期工艺过程中遗传毒性效应的变化。

2 原水特征及处理工艺

2.1 原水水质特征

与其他地区的水体相比, 实验原水的碱度和 pH 值较低, 浊度较高, 有机物含量较低(见表 1)。取三个季节进行对比, 冬季原水碱度较高, 浊度相对较低, 虽然秋季原水 DOC 值较低, 但 UV_{254} 值较高, SUVA 大于 3, 说明其中腐殖质类有机物含量较高, 具有较高的可混凝去除性。

表 1 长江中下游某市三个季节原水性质

Table 1 Water sample quality of a city in the middle and lower reaches of Yangtze River

浊度/NTU	pH(16.4 °C 下)	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	UV_{254} / cm^{-1}	SUVA/ ($\text{m}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{L}$)	TAI/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TCa/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TMn/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
26.8	7.94	1.805	0.045	2.493	0.08	35.02	0
TFe/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TSi/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TMg/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	HON	HOB	HOA	WHOA	HiM
0.02	3.92	6.69	1.14%	12.38%	40.34%	17.66%	28.48%

此外, 实验原水有机物中以憎水酸和亲水性物质为主, 憎水性组分为较易被混凝去除的大分子有机物, 而亲水性物质为较难被混凝去除的小分子有机

物。三个季节的 DOM 化学分级组分分布相似, 秋季原水的憎水酸部分含量相对较高, 亲水性物质部分含量相对较低, 因此可混凝去除性较高。

利用 HPSEC 对原水进行分析^[11-44] 结果见图 1。由图 1 可知: 实验原水 DOM 的分子量在 200 ~ 4000 Da, 分子量从小到大分为 5 部分(5 个峰) 峰 1、峰 2 为小分子物质, 峰 3、峰 4 为小分子腐殖质, 峰 5 为大分子腐殖质, 小分子量有机物均为不易混凝去除的亲水性有机物, 大分子量有机物均为较易混凝去除的憎水性有机物。三个季节的原水 DOM 分子量分布比较相似, 秋季原水 DOM 的峰 2、峰 3 和峰 4 含量较高, 即憎水性的腐殖质类有机物含量较高, 因此可混凝去除性较高, 这与原水 DOM 化学分级的分析结果一致。

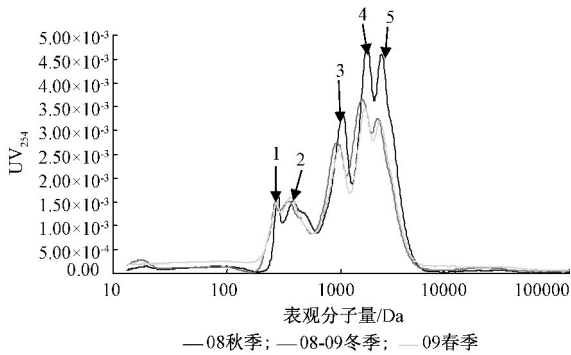


图 1 高性能尺寸排除色谱法 (HPSEC) 测得原水的分子量分布

Fig. 1 Molecular weight distribution by high performance size-exclusion chromatography (HPSEC) for raw water

2.2 样品采集及处理工艺介绍

样品来自长江中下游某市一自来水厂现有的运行工艺(流程 1 和 2) 如图 2 所示。不同工艺流程及不同处理单元出水共取样 6 份。水样经玻璃纤维滤膜(APFF, MILLIPORE) 过滤后再用 HLB 柱(500 mg, OASIS) 富集, 然后分别以 5 mL 正己烷/二氯甲烷(1:1, 体积比) 和 10 mL 甲醇/二氯甲烷(1:9, 体积比) 为淋洗剂洗脱, 所有有机溶剂均为农残级纯度或色谱纯, 购自 J. T. Baker 公司。洗脱液用氮气吹干, -20 °C 下保存用于生物测试。

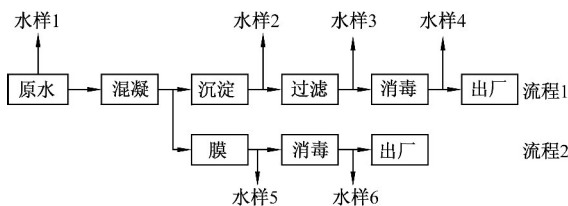


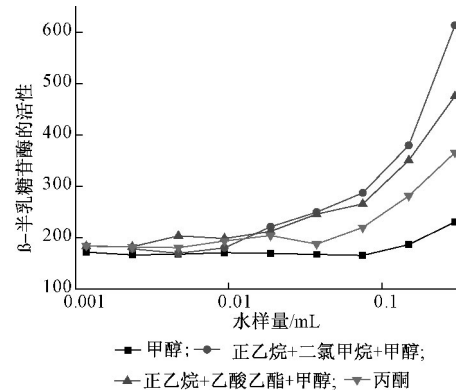
图 2 水处理工艺流程示意

Fig. 2 The simplified flow diagram of the water treatment process

3 洗脱有机溶剂的讨论

首先采用 Oasis HLB 固相萃取柱对水样进行浓缩, 分别选用 4 种极性不同的有机溶剂(组合)^[15-47] 洗脱吸附于 HLB 固相萃取柱上的致突变物质, 将获得的 4 个馏分分别用氮气吹干, 用 DMSO 定容到 20 μ L 后, 供遗传毒性测试。

图 3 表示不同洗脱溶剂对遗传毒性诱导效果的影响。从图 3 可以发现: 用甲醇洗脱时, 在较高的水样体积 100 μ L(或大于 100 μ L) 时, 才开始出现活性, 之后随着水样体积增加, 活性继续上升, 对遗传毒性物质的洗脱效果并不理想; 改变洗脱溶剂为丙酮时, 发现规律基本相近。鉴于以上结果, 选择了极性介于甲醇和丙酮之间的 2 种洗脱溶剂: 正己烷 + 二氯甲烷 + 甲醇和正己烷 + 乙酸乙酯 + 甲醇, 并测试了其遗传毒性。发现这 2 种洗脱液在较低水样添加量的情况下, 就开始显示出遗传毒性, 到水样添加到 100 μ L 时显示出极强的急性毒性。从实验结果分析, 正己烷 + 二氯甲烷 + 甲醇和正己烷 + 乙酸乙酯 + 甲醇这 2 种组合对样品遗传毒性物质的洗脱效果是较明显的。由于水样的特征存在区域特点, 不同水样采用不同洗脱剂得到的效果可能不同。因此, 本实验针对该地区的水样选用正己烷 + 二氯甲烷 + 甲醇作为洗脱剂。



注: β -半乳糖苷酶活性数值为每 1 个 OD₆₀₀ 值对应的单位数。

图 3 利用 UMU 法检测不同洗脱方法下水样的剂量 - 反应曲线

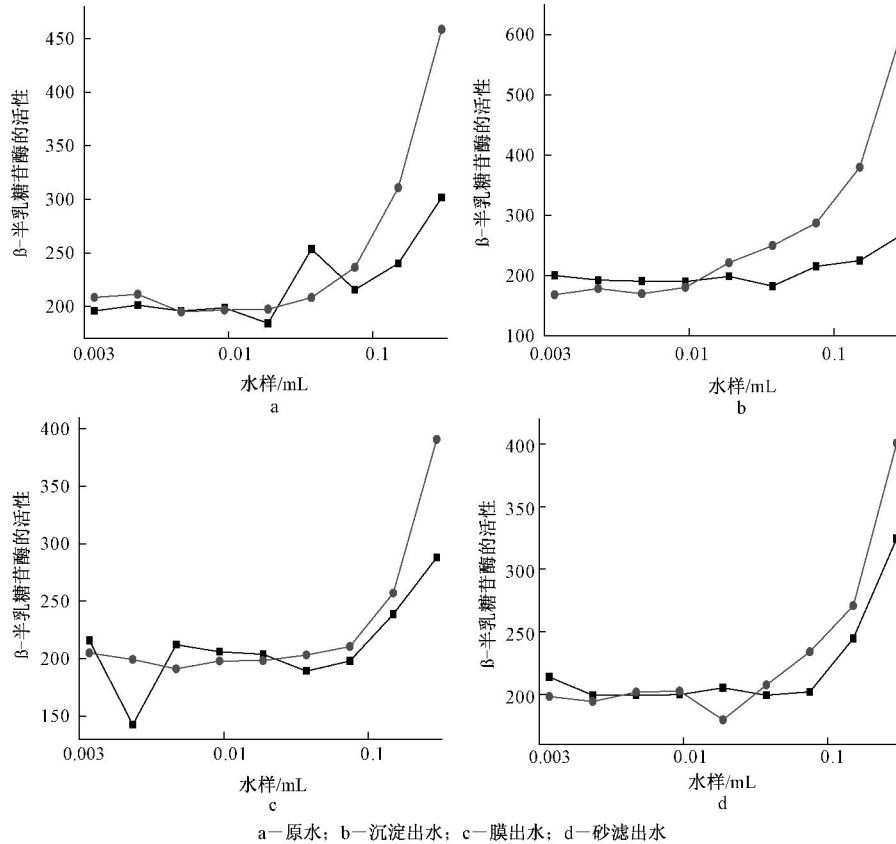
Fig. 3 The dose-response curves in different eluted methods of UMU test for the water samples

4 氯化对水样遗传毒性的影响

氯消毒和氯胺消毒是现有自来水厂中应用最广泛的饮用水消毒方法。但是很多研究表明, 氯会与水中的溶解性有机物(DOM) 反应生成具有致突变性或致癌性的消毒副产物(DBPs)。对于饮用水的氯消毒, 大多数研究仅针对几种典型的消毒副产物如三卤

甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs),但是水中的溶解性有机物是非常复杂的,包括腐殖质、溶解性微生物产物和动植物残体等。一方面,一些溶解性有机物本身就具有毒性;另一方面,一些天然有机物与氯反应后会生成有毒的消毒副产物^[18-22]。因此,测定氯化消

毒后有机提取物的遗传毒性比仅测定几种典型消毒副产物的生成更能全面地评价氯化饮用水的生态安全性。实验对不同工艺段包括原水、沉淀出水、膜出水、砂滤出水等分别进行了氯化实验,结果见图4。



注: β -半乳糖苷酶的活性数值为每1个 OD₆₀₀ 值对应的单位数。

图4 利用UMU法对水样进行检测的剂量-反应曲线

Fig. 4 The dose-response curves in UMU test for the water samples

与所有文献报道结果相同,本实验中不同工艺段水样加氯后UMU值都有明显增高,即表现为遗传毒性效应增高,即来自原水的有机物(天然类有机物如藻类及腐殖质等)在氯化过程中通过卤代反应将产生致突变物,现有常规工艺对水体中有机污染物的去除,特别是亲水小分子有机物的去除能力有限。由图4可知:在氯化过程中,所有水样的遗传毒性都有不同程度上升,这一结果也可充分说明原水中所含的天然有机物在氯化后都有潜在的导致遗传毒性物质存在,因此如果不考虑消毒等其他因素,不推荐使用前加氯处理。

5 不同工艺段出水遗传毒性的对比

为了更好地比较膜法与常规法处理后出水的遗传毒性指标变化,本研究选择常规工艺和膜工艺流程

中的4个水样,分别用UMU法进行测试,结果如图5所示。

常规工艺中,混凝是饮用水处理的关键过程,适宜的混凝剂、良好的混凝效果,对后续过滤、吸附等起到了保障作用。常规的混凝沉淀可较好地去除大分子有机物和非溶解性色度以及部分Ames试验前体物。有研究证明,天然水体中小分子有机物常常部分被吸附在腐殖质分子上,在向水中投加硫酸铝以后,由于金属离子与富里酸所形成的水溶性络合物更加稳定,使富里酸与有机物之间原有的结合大大减弱,致使富里酸分子所吸附、络合的有机物得以释放,因而使混凝沉淀出水中小分子有机物增加,使其遗传毒性效应有增加的可能。但由图5a可知:水样2的IR比水样1下降了10%,混凝阶段IR值有明显下降,说

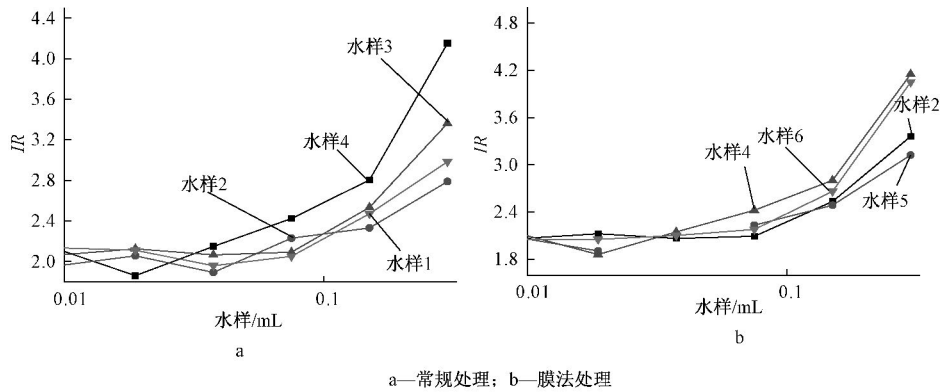


图 5 不同水样处理的 IR 值曲线
Fig. 5 The IR values curves for different process of water samples

明良好有效的混凝过程对遗传毒性物质的去除有一定效果,与大量文献报道一致^[23];水样3、水样1、水样2分别比水样4下降了19%、29%、36%。由此可知,最后的消毒过程对IR值有明显的提升作用,这也意味着常规氯消毒产生的副产物在遗传毒性指标的表现上有很大贡献;同时也可发现,在该工艺流程中砂滤后的出水中IR值有一定程度的回升,这说明在砂滤过程中,水样中具有遗传毒性物质总量发生了变化,但并不显著,因此砂滤过程对遗传毒性的确切影响值得继续深入探讨。

膜工艺段出水取自采用浸入式PVC合金超滤膜构建的超滤技术之后,且水厂已在该地区成功供水5~6年,膜技术在该水厂有着较好的适用性。对膜工艺段的出水分析结果如图5b所示。膜法出水就遗传毒性指标来看,不论是消毒前还是消毒后,指标均优于常规出水。从图5b中可以看出:消毒前膜法出水IR值比常规出水IR值降低了3.0%,消毒后膜法出水IR值比常规出水降低了2.4%,但这个优势并不明显,况且由于水样的特定性,不同地区水样中有机物的组成有很大差异,结果可能会大相径庭,因此膜法处理技术是否在遗传毒性指标方面比常规处理具有优势,仍需大量的资料或数据支持。

6 结论及分析

1) 针对UMU遗传毒性的分析,对该地区的水样采用正己烷+二氯甲烷+甲醇进行洗脱效果更为明显。

2) 对于常规处理工艺来说,混凝是污水深度处理的关键过程,混凝段的出水可使遗传毒性指标明显下降,这进一步证明了高效混凝可有效去除原水中大分子有机物和非溶解性色度以及部分Ames试验前体物。

3) 氯化可明显增加水样的遗传毒性,不论消毒

前与消毒后,膜法出水就遗传毒性指标来看,均优于常规工艺出水,但考虑到水样的区域性,膜法处理是否在遗传毒性这一指标方面比常规处理具有绝对优势,仍需大量的资料或数据支持。

参考文献

- [1] Hu J Y, Takako A. Products of aqueous chlorination of 17 α -estradiol and their estrogenic activities [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 1897-1993.
- [2] Von G U. Ozonation of drinking water: Oxidation kinetics and product formation [J]. *Water Res* 2003, 37: 25-34.
- [3] Yu XR, Wang D, Zhou J, et al. Assessing the ecological risk of soil irrigated with wastewater using in vitro cell bioassays [J]. *J Environ Sci Health. Part A*, 2008, 43: 1618-1627.
- [4] Onstad G D, Weinberg H S, Krasner S W. Occurrence of halogenated furanones in US drinking waters [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 3341-3348.
- [5] Hendriks A J, Maas-Diepeveen J L, Noordsij A. Monitoring response of XAD-concentrated water in the thins delta: A major part of the toxic compounds remains unidentified [J]. *Water Res*, 1994, 28: 581-598.
- [6] Schenck K, Sivaganesan M, Rice G. Correlations of water quality parameters with mutagenicity of chlorinated drinking water samples [J]. *J Toxicol and Environ Health, Part A*, 2009, 72: 461-467.
- [7] Smeds A V T, Maki-Paakkanen J, Kronberg L. Concentrations of ames mutagenic chlorohydroxyfuranones and related compounds in drinking waters [J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31: 1033-1039.
- [8] Wang L S, Hu H Y, Wang C. Effect of ammonia nitrogen and dissolved organic matter fractions on the genotoxicity of wastewater effluent during chlorine disinfection [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 40: 160-165.
- [9] Wang D S, Tang H X, Gregory J. Relative importance of charge neutralization and precipitation on coagulation of kaolin with PACl: effect of sulfate ion [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 1815-1820.
- [10] Wang D S, Xu Z Z, Zhao Y M. Change of genotoxicity for raw and

- finished water: Role of purification processes [J]. *Chemosphere*, 2011, 83: 14-20.
- [11] Wei Q S, Feng C H, Wang D S. Seasonal variations of chemical and physical characteristics of dissolved organic matter and trihalomethane precursors in a reservoir: a case study [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 150: 257-264.
- [12] Chow C W K, Fabris R, Drikas M. A rapid fractionation technique to characterize natural organic matter for the optimization of water treatment processes [J]. *J Water Supply Res and Technol Aqua*, 2004, 53: 85-92.
- [13] Chow C W K, Fabris R, Drikas M. A case study of treatment performance and organic character [J]. *J Water Supply Res and Technol Aqua*, 2005, 54: 385-395.
- [14] Chow C W K, Fabris R, Leeuwen J Ven, et al. Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42: 6683-6689.
- [15] Tian J Y, Chen Z L, Yang Y L, et al. Consecutive chemical cleaning of fouled PVC membrane using NaOH and ethanol during ultrafiltration of river water [J]. *Water Res*, 2009, 44: 59-68.
- [16] Reifferscheid G, Ileil J, Ode Y, et al. Amicroplate version of the SOS/UMU-test for rapid detection of genotoxins and genotoxic potentials of environmental simples [J]. *Mutat Res*, 1991, 253: 215-222.
- [17] Gu W, Hu J, Wang W, et al. Improvement of concentration method for detecting genotoxic activities of drinking water using UMUC-Test [J]. *Environ Sci*, 2005, 26: 122-125.
- [18] Wang L S, Hu H Y, Wang C. Effect of ammonia nitrogen and dissolved organic matter fractions on the genotoxicity of wastewater effluent during chlorine disinfection [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 40: 160-165.
- [19] Myllykangas T, Nissinen T K, Maki-Paakkanen J, et al. Bromide affecting drinking water mutagenicity [J]. *Chemosphere* 2003, 53: 745-756.
- [20] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research [J]. *Mutat Res*, 2007, 636: 178-242.
- [21] Smeds A V T, Maki-Paakkanen J, Kronberg L. Concentrations of Ames mutagenic chlorohydroxyfuranones and related compounds in drinking waters [J]. *Environ Sci & Technol*, 1997, 31: 1033-1039.
- [22] 徐超. 几种内分泌干扰物的对映体选择性毒性及其降解 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [23] 朱舟, 顾炜旻, 安伟, 等. 基于 UMU 遗传毒性效应的饮用水致癌风险评价的尝试 [J]. *生态毒理学报*, 2008, 3(4): 363-369.

第一作者: 石健(1972-), 女, 副教授, 主要研究方向为水污染控制技术。shijianchuyu@163.com

(上接第 23 页)

2) CLS 对亚甲基蓝的吸附行为符合 Lagergren 准二级动力学模型, 吸附过程为物理扩散吸附与化学吸附并存。

3) CLS 对亚甲基蓝的吸附符合颗粒内扩散速率方程, 以颗粒内扩散为控制步骤。

4) CLS 对亚甲基蓝的吸附性能优于纯淀粉和炭黑。

参考文献

- [1] 赵颖, 王仁国, 曾武, 等. 纳米二氧化锰的制备及其对亚甲基蓝的吸附研究 [J]. *水处理技术*, 2012, 38(2): 55-58.
- [2] 胡志勇. 泥炭对废水中结晶紫和亚甲基蓝的吸附规律研究 [D]. 湖南: 南华大学, 2011: 2-5.
- [3] Grady J, Glen T, Henry C L. *Biological Wastewater Treatment* [M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 1.
- [4] 蔡晶, 柴社立, 芮铭先, 等. 玉米淀粉废水的处理技术 [J]. *环境工程*, 2007, 25(1): 72-73.
- [5] 张淑娟, 杨宇. 无机-有机复合絮凝剂 PST 处理印染废水效果研究 [J]. *环境工程*, 2011, 29(S1): 7-9.
- [6] 具本植, 张淑芬, 杨锦宗. 交联阳离子淀粉的制备及其脱色性能 [J]. *应用化学* 2001, 18(6): 476-480.
- [7] Borah D, Satokawa S, Kato S. Characterization of chemically modified carbon black for sorption application [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254: 3049-3056.
- [8] Borah D, Satokawa S, Kato S. Sorption of As(V) from aqueous solution using acid modified carbon black [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162: 1269-1277.
- [9] 杜二玲. 新型炭黑材料对水中有机污染物吸附性能研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [10] 龚兵丽, 邱宇平, 赵雅萍. 黑碳吸附亚甲基蓝染料废水的行为研究 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(11): 18-23.
- [11] 曹同玉, 刘庆普, 胡金生. 聚合物乳液合成原理性能及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [12] 赵明, 王荣民, 张慧芳, 等. 反相乳液聚合制备丙烯酰胺-二甲基二烯丙基氯化铵阳离子共聚物 [J]. *甘肃高师学报*, 2010, 15(2): 20-23.
- [13] 刘盈海. 二过碘酸合铜(III)钾引发丙烯酸甲酯在活性炭表面接枝聚合的研究 [J]. *精细石油化工进展*, 2005, 6(3): 1-3.
- [14] Mamdouh M N. Intraparticle diffusion of basic red and basic yellow dyes on Palm fruit bunch [J]. *War Sci Tech*, 1999, 40(7): 133-139.
- [15] 黄慧, 郝硕硕, 朱家亮, 等. 天然和 CPB 改性沸石对 Hg^{2+} 的吸附特征 [J]. *环境工程学报* 2013, 7(12): 579-584.

第一作者: 刘元伟(1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事废水处理及高分子合成研究。hbgfz@163.com