

秦瑛蔚, 刘兵, 胡杨, 等. 污水处理过程中双酚 A 的环境健康风险分析综述[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 20–28, 62.

QIN Y W, LIU B, HU Y, et al. Overview on analysis of environmental health risk for bisphenol A in wastewater treatment process[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 20–28, 62.

污水处理过程中双酚 A 的环境健康风险分析综述

秦瑛蔚¹, 刘 兵^{2,*}, 胡 杨^{3,*}, 王 静², 陈禹兮², 史水合⁴

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101; 3. 山东交通规划设计院, 山东济南 250101; 4. 山东省菏泽生态环境监测中心, 山东菏泽 250000)

摘 要 双酚 A (BPA) 是市政污水处理厂常见的内分泌干扰物。作为一种新污染物, BPA 具有低剂量、较高毒性的特征, 对生态环境及人类健康存在潜在影响。文章系统总结了污水处理厂中 BPA 常见去除方法及其特点, 通过分析部分污水处理厂再生水中 BPA 残留现状, 得出 BPA 的主要去除途径为污泥吸附和生物降解, 且其处理效果受设备参数、操作条件等综合因素影响。文章同时对不同工艺流程中 BPA 去除效果进行对比分析, 指出了深度处理工艺对提高 BPA 去除效果的重要性。环境健康风险评价表明, 现阶段污水处理过程中的 BPA 对人类健康风险较低, 处于可接受范围, 但其潜在风险仍值得人们关注, 亟需探究科学合理的去除手段和完善的风险评价方法。最后, 文章针对污水处理过程中 BPA 环境健康风险分析方面研究提出了合理化建议。

关键词 污水处理厂 双酚 A 去除效果 人体暴露 健康风险评价

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0020-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.003

Overview on Analysis of Environmental Health Risk for Bisphenol A in Wastewater Treatment Process

QIN Yingwei¹, LIU Bing^{2,*}, HU Yang^{3,*}, WANG Jing², CHEN Yuxi², SHI Shuihe⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Resource and Environmental Innovation Research Institute, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. Shandong Transportation Planning and Design Institute, Jinan 250101, China;

4. Shandong Heze Ecological and Environment Monitoring Center, Heze 250000, China)

Abstract Bisphenol A (BPA) is a common endocrine disruptor in municipal WWTP. As an emerging pollutant, it has character of high toxicity and has potential impacts on ecological environment and human health. This paper systematically summarizes the common removal methods of BPA in WWTP and respective method's characteristic, and concludes that the main removal pathways of BPA is sludge adsorption and biodegradation, via analyzing the current situation of BPA residues in reclaimed water of some WWTP, while the BPA removal efficiency is influenced by equipment parameters, operating conditions and other comprehensive factors. A comparative analysis of the BPA removal effect in different processes points out the importance of advanced treatment process to improve the BPA removal effect. The environmental risk evaluation shows that the risk of BPA in wastewater treatment process to human health is low and is in the acceptable range at current stage, but its potential risk still deserves attention, and scientific and reasonable removal means and detection methods should be explored urgently. Finally, this paper presents rationalized recommendations for research on the environmental health risk of BPA in wastewater treatment processes.

[收稿日期] 2023-05-09

[基金项目] 山东省交通设计集团 2023 年度科技攻关“揭榜挂帅”项目(鲁交设-KC.YS-2023-006); 国家重点研发计划(政府间重点专项)(2022YFE0105800); 住房和城乡建设部研究开发项目(2021-K-113); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME236); 山东省高端人才项目支持计划(0031504)

[作者简介] 秦瑛蔚(2002—), 女, 研究方向为环境科学, E-mail: qyw15092213909@163.com。

[通信作者] 刘兵(1982—), 男, 教授, 博士, 研究方向为水处理、有机废弃物资源化、环境数学模型, E-mail: b-liu@sdjzu.edu.cn。

胡杨(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为给排水、暖通设计, E-mail: 157776994@qq.com。

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) bisphenol A (BPA) removal efficiency human exposure health risk evaluation

双酚 A (bisphenol A, BPA) 是一种典型的内分泌干扰物和环境雌激素,长期暴露会干扰人体内分泌及代谢活动并对生殖发育造成危害^[1]。BPA 作为一种重要的工业生产原料,常用于合成环氧树脂和聚碳酸酯塑料等材料,可当作生产增塑剂、阻燃剂、热稳定剂等产品添加剂^[2],应用范围广泛,在环境中已无处不在。环境中 BPA 难以降解,具有明显的亲脂性且易于在生物体内富集,可通过食物链传递或皮肤接触暴露^[3],危害人体健康。流行病学研究^[4]表明,BPA 具有低浓度高毒性,其作为环境内分泌干扰物,会以激素形式作用于机体,干扰人体内分泌及代谢活动,引起人体代谢紊乱^[5],导致糖尿病、高脂血症、高血压等代谢综合征^[6-7]。同时,BPA 作为一种烷基类环境雌激素,会干扰天然雌激素的合成、转运和代谢,对人体生育系统功能^[8-13]、胚胎和神经系统^[14-15]发育、儿童肥胖^[16]等方面有影响。

我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中对 BPA 的限值为 0.01 mg/L^[17],正常人类接触低

于该剂量,但水环境中 BPA 可对人类产生长期低剂量的接触和暴露,使其在远低于该限值时便可引起毒理效应^[8]。当水环境中存在多种酚类物质时,多种污染物综合毒性可能远远超过其本身的毒性^[18],威胁人类健康,因此,开展 BPA 环境健康风险评估,并判断该风险是否在可接受范围内及其危害程度显得尤为重要。

1 污水处理中 BPA 的去除方式及残留现状

1.1 BPA 去除方式

随着 BPA 生产及应用范围不断扩大,各类环境介质和人体中普遍检出 BPA 及其类似物,现阶段的污水处理工艺无法将 BPA 完全消除,再生水中仍有少量残留^[19],释放到自然环境中发生迁移和转化,会对周围环境中敏感受体和生物产生危害^[20]。目前,在众多水源中都检测出 BPA 的存在^[21],为减少 BPA 的环境暴露及健康风险,阐明双酚类物质在市政污水处理厂中的去除机理,提高再生水中 BPA 的去除效率迫在眉睫。总结污水处理过程中常见的 BPA 处理方法如表 1 所示。

表 1 常见污水处理中 BPA 去除方法
Tab. 1 Common Methods of BPA Remove in Wastewater Treatment

方法名称	原理	技术优点	技术缺点	参考文献
物理吸附法	通过吸附剂吸附 BPA,使 BPA 与水分离去除	简单易行,成本效益高,不会产生二次污染,具有高效特性	不能将污染物质完全转化去除,经过一定时间后,吸附剂上污染物可能重新解吸进入水环境	[22]
生物处理法	活性污泥法	有溶解氧的条件下,利用活性污泥的絮凝和氧化分解作用净化水体中 BPA	工艺简单,受气候影响小,投资少,运行费用低,处理效率高	[23]
	生物膜法	依靠固体表面微生物降解代谢,消除水体中 BPA	耐冲击负荷性能好,固体表面微生物适应性强,剩余泥沙量少	[24]
化学处理法	化学氧化法	通过化学反应改变 BPA 物理或化学性质,使其与水分离去除	固体表面的微生物量较难控制,空间效率低,后期运营成本高	[25]
	光降解法	通过强烈的光化学反应将水中有 BPA 分解	氧化剂使用方便,不会形成二次污染	[26]
	电化氧化法	通过强烈的光化学反应将水中有 BPA 分解	可高效降解微量持久性难生物降解的有机物	[27]
		中性水溶液中,BPA 被氧化去除,在碳纤维构成的电极阳极氧化形成薄膜	处理过程较复杂,氧化剂消耗大,处理费用偏高	
		无需添加化学药剂,二次污染小	酚类化合物会生成聚合物,降低电极的利用率,且电极材料昂贵	

物理吸附法具有操作简单、经济高效的特点,利用吸附作用去除污水中难降解有机物,可与生物降解协同作用,强化 BPA 去除效果^[28]。生物处理法是最常用的污水处理技术,其中生物降解和污泥吸附对 BPA 的去除起主要作用。目前,污水处理厂常

用的生物降解工艺有厌氧-好氧(AO)工艺、厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺、氧化沟(OD)工艺、序列间歇式活性污泥(SBR)工艺等^[29]。化学氧化法通过投加化学药剂氧化降解 BPA,使其转为沉淀或漂浮状态从水中分离和去除,在污水处理厂中可作深度

处理工艺。

1.2 不同生物处理工艺对 BPA 的去除效果

工业废水和生活污水排放是 BPA 进入自然环境的重要途径^[30],不同污水处理厂采用的处理工艺及运行参数不同,使得 BPA 的去除效果存在一定的差异,现有污水处理厂主要采用生物处理工艺^[31]。我国东部地区人口密集、城镇化水平高,排放污水总量大,因此,污水处理厂建设相对集中且设施建设健全。整理得到我国 7 个代表性城市不同污水处理厂 BPA 的进出水含量及其去除效果,结果如表 2 所示。

表 2 各地区不同污水处理厂中 BPA 残留
Tab. 2 BPA Residues in Different WWTPs in Various Regions

城市	处理工艺	污水类别	进水/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率	研究结论	参考文献
北京	活性污泥法处理工艺	生活污水	21.30	—	71.6%~90.5%	曝气活性污泥法对 BPA 的去除效果较好,含有有毒有害物质	[32]
南宁	微孔曝气 OD 处理工艺	生活污水	2.86	0.87	69.6%	生物吸附和生物降解对 BPA 去除起主要作用	[33]
北京	生物处理工艺	生活污水和工业废水各 50%	825.00	—	90.0%~99.0%	污水中含多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯(PAEs)等 30 种内分泌干扰素(EDCs),污泥吸附对各类 EDCs 去除作用最大	[34]
南京	活性污泥处理工艺	工业废水	849.00	187.00	77.9%	污水处理厂对 BPA、四溴双酚 A 及 6 种烷基酚类化合物进行液相色谱-串联质谱法分析检测,出水中存在一定 BPA 残留	[35]
东莞	AAO 处理工艺	工业废水	9.89	0.58	94.1%	工业废水处理厂中辛基酚(OP)、壬基酚(NP)和 BPA 浓度高于生活污水处理厂,各污水厂出水中 BPA 已基本被去除,存在少量雌激素效应	[31]
东莞	OD 处理工艺	生活污水	0.32	0.01	96.0%		
西安	AAO 处理工艺	生活污水	0.31±0.06	0.02±0.01	93.8%	BPA 主要在生化处理阶段被去除	[36]
厦门	曝气生物滤池(BAF)工艺	生活污水	1.30	0.03	97.0%	生物降解和污泥吸附去除废水中的 BPA,去除效果受季节影响	[37]
西安	AAO+MBBR 复合深度处理工艺	生活污水和生产废水	299.40	12.01	95.9%	苯酚、五氯酚(PCP)、2,4-二氯苯酚(2,4-DCP)、BPA 常用来合成塑料、纤维等产品,是重要的化工原料,在生产废水中含量高,深度处理工艺对 BPA 去除效果较好	[38]
上海	一体化活性污泥法工艺	生活污水	0.35	—	100.0%	BPA 在生化池中去除率达到 80.2%,整体去除效果好	[39]
上海	食物链反应污水处理技术(FRC)	工农业废水和生活污水	0.07	—	100.0%	曝气池是污水厂处理 BPA 的一种高效工艺	[39]
上海	改良型的卡鲁塞尔 OD 工艺	生活污水和养殖场污水	0.07	0.01	95.4%	OD 生化池对 BPA 处理效果适中,去除率为 56.72%	[39]

如表 2 所示,污水经污水处理过程后,污水中大部分有机污染物可有效去除,多数污水处理厂对 BPA 的去除率在 90%以上,仅有小部分污水处理厂对 BPA 处理效果略低,且各污水处理厂出水水质中 BPA 浓度均低于国家标准限值。经过总结,BPA 的去除率差异性可能与以下两个因素有关:一是因为 BPA 主要应用于化学工业生产中,由表中信息可知,以工业废水为主要污水来源的污水处理厂进水中 BPA 含量高,工业生产原料种类繁多、废水成分复杂,绝大多数为有毒有害物质,BPA 作为工厂生产聚碳酸酯、环氧树脂塑料的原材料,同一地区工业废水中含量一般高于生活污水排放^[29],常规工艺无法将难降解有机物完全去除;二是不同污水处理工艺对 BPA 处理效果有所差异^[40],在污水处理过程中温度、pH^[41]、季节、污泥停留时间(SRT)等因素均会影响 BPA 的去除效果^[42]。Nie 等^[43]研究结果显示,夏季污水处理厂 BPA 的去除率远高于冬季。Clara 等^[44]研究发现,更长的 SRT 和水力停留时间

(HRT)可能会提高 BPA 的去除效果。活性污泥处理工艺是目前在城镇污水处理厂中最常用的工艺^[45],对比不同地区污水处理厂 AAO 工艺、OD 工艺、一体化工艺 3 种典型污水处理工艺中 BPA 的去除效果如图 1~图 3 所示。

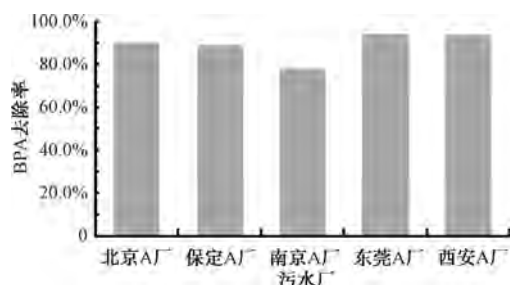


图 1 不同地区 AAO 污水处理工艺对 BPA 去除率^[31]

Fig. 1 BPA Removal Rate by AAO Process in Different Regions^[31]

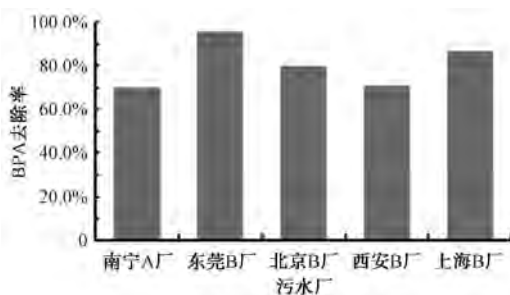


图 2 不同地区 OD 污水处理工艺对 BPA 去除率^[31]

Fig. 2 BPA Removal Rate by OD Process in Different Regions^[31]

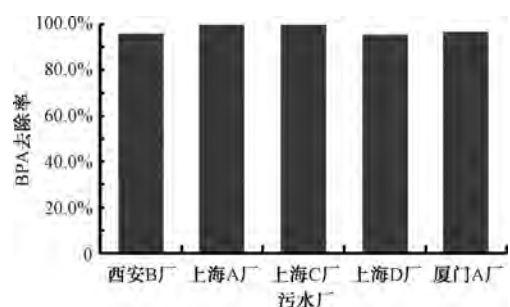


图 3 不同地区一体化污水处理工艺对 BPA 去除率^[37]

Fig. 3 BPA Removal Rate at Different Treatment Processes in Different Regions^[37]

如图 1~图 3 所示,3 种处理工艺对 BPA 均有较好去除效果,一体化工艺对 BPA 去除效果最好,去除率为 95%~100%,且具有较好的经济性和环境适应性^[39]。AAO 工艺和 OD 工艺对 BPA 去除效果略低于一体化工艺,整体去除率可达 70%。AAO 工艺和 OD 工艺的生物处理核心技术均为活性污泥法,通过微生物的吸附和降解去除污水中有机污染物,

从而显著降低 BPA 在环境中的残留浓度,两者对 BPA 去除效率无显著差异。根据不同污水处理厂 BPA 的去除率比较可以看出,采用相同工艺的不同污水处理厂对 BPA 去除效果也有所差异,其原因可能是不同地理位置的污水处理厂进水污染源不同,污水组成成分和进水中 BPA 含量不同,导致污水处理效果有所差异^[39]。由于 BPA 常用作工业原料,进水中工业废水较生活污水占比多的城镇污水处理厂 BPA 的含量较高,去除难度更大,BPA 去除率偏低。另外,相同工艺不同处理单元的设施结构选择、设备参数、操作条件等综合因素的差异,也会对 BPA 处理效果产生影响^[45]。薛桥^[38]研究发现,曝气沉砂池的曝气作用可影响 BPA 的挥发强度,增大曝气量可提高 BPA 去除效率,深度处理单元中紫外线消毒法对 BPA 的去除效果优于线位转盘滤池与接触消毒池结合的工艺方法。

1.3 污水处理厂各处理阶段中 BPA 的去除效果

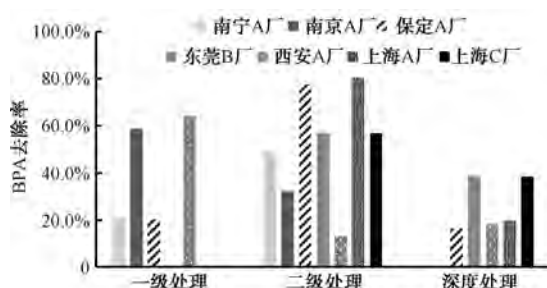
污水处理工艺按处理程度可划分为一级处理、二级处理和深度处理,受处理工艺和运行参数的影响,BPA 去除效果存在一定差异,计算不同污水处理厂各级处理阶段 BPA 去除率,根据表 3 数据^[31,33,35,38-39,46-47]绘制图 4。

研究数据^[40]表明,在污水处理各单元中,初沉池、生物处理单元、二沉池和深度处理工艺对 BPA 均有一定去除作用。初沉池主要将吸附态 BPA 去除,曝气沉砂池可加速 BPA 等酚类物质挥发速度^[48],提高 BPA 去除效果。二级处理是污水处理工艺的核心环节,BPA 去除效果最为明显^[33],大部分 BPA 经好氧、缺氧、厌氧等过程被微生物降解^[29],还有少部分被活性污泥吸附,在二沉池中实现泥水分离和净化。在常用的生物处理工艺中,活性污泥去除 BPA 的效果最佳,其次是生物曝气池工艺和氧化塘工艺^[49-50]。Ronen 等^[51]研究发现,好氧条件有利于 BPA 去除,缺氧条件下 BPA 较难被降解,因此,改良的活性污泥工艺如 AAO 工艺和 OD 工艺被广泛应用于污水处理厂。由表 3 可知,一、二级处理阶段后 BPA 的去除率可达到 60%~80%,污水已经得到很大程度的净化,但为进一步提升出水水质,还需进行深度处理,以去除残存的难降解有机物和可溶性的无机物^[38]。在一、二级处理阶段 BPA 去除效果不佳的情况下,后续深度处理工艺可提升 BPA 去除效果,常见工艺有活性炭吸附法、臭氧氧

表 3 不同污水厂各级处理过程中 BPA 去除率

Tab. 3 BPA Removal Rates in Different WWTPs at Different Levels of Treatment Process

污水处理厂	处理工艺	一级处理	二级处理	深度处理	总去除率	参考文献
南宁 A 厂	微孔曝气 OD 处理工艺	21.0%	48.6%	—	69.6%	[33]
南京 A 厂	活性污泥处理工艺	58.6%	32.2%	—	77.9%	[35]
淮南 A 厂	OD 处理工艺	40.5%	39.0%	—	79.5%	[46]
东莞 B 厂	OD 处理工艺	—	57.1%	38.9%	96.0%	[31]
保定 A 厂	AAO+缺氧、好氧工艺	20.2%	77.7%	16.5%	88.9%	[47]
西安 A 厂	AAO+MBBR 复合深度处理工艺	64.2%	13.3%	18.4%	95.9%	[38]
上海 A 厂	一体化活性污泥法工艺	—	80.2%	19.8%	100.0%	[39]
上海 C 厂	改良型卡鲁塞尔 OD 工艺	—	56.7%	38.6%	95.6%	[39]

图 4 不同污水处理厂 BPA 的总去除效果^[31-33,35,38-39,46-47]Fig. 4 Total BPA Removal Rates of Different WWTPs^[31-33,35,38-39,46-47]

化法、膜分离法等^[52]。其中紫外消毒方式通过光降解方式对 BPA 降解^[53],可使 BPA 去除率达到 95% 以上,有效提升 BPA 的去除效果和出水水质状况。

2 BPA 污染物环境健康风险分析

BPA 在生产、应用、降解等过程中可通过多种途径进入环境水体中,对环境造成污染,并不可避免地渗入人类生态系统,而对人类健康造成不利影响^[5]。污水处理过程中 BPA 残留量较少,人体暴露的主要方式为日常生活中皮肤接触或消化道吸收所致^[3]。现有研究^[54]表明,当再生水中存在多种酚类物质时,多种污染物综合毒性可能远远超过其本身的毒性,处于“共暴露”的状态,放大对人类健康的危害。为此,可利用美国环境保护署认可的非致癌污染物健康风险评价方法对污水处理厂中 BPA 经污水处理工艺所残留的环境健康风险进行初步评估。

通过计算人类环境水体中 BPA 经某种暴露途径(例如皮肤、消化道等途径)的日均暴露剂量(ADD)与非致癌效应的污染物参考剂量(RfD)的比值,得到健康风险指数(HI)。计算如式(1)。

$$H_1 = \frac{A_D}{R_{fD}} \quad (1)$$

其中: A_D ——ADD 的值, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$;

R_{fD} ——RfD 的值, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$;

H_1 ——HI 的值。

当 $HI < 1$ 时,表明该污染物对人体健康的危害可忽略不计,认为不存在健康风险;当 $HI > 1$ 时,则表明此污染物具有较高的健康风险,可能会对人体健康造成一定程度的危害。殷伟等^[49]对代表性污水处理过程中 BPA 的人体暴露健康风险进行评估,得出 BPA 与人体皮肤接触或经消化道等暴露途径的 $HI < 1$ ^[50],健康风险较低,对人体健康产生的危害可忽略不计。图 5 为某市环境水体不同采样点 BPA 经饮水和皮肤两种方式暴露对成年人及儿童的健康风险评估结果^[55],可以看出 BPA 经食物链进入人体消化道的暴露方式比皮肤接触暴露方式的健康风险更高^[56]。

儿童期是个体生长发育的关键时期,此时部分器官尚未发育成熟^[57-58],与成人相比,对内分泌干扰物具有更强的敏感性,BPA 健康暴露风险普遍高于成年人^[59]。研究^[60]表明,长期 BPA 暴露可能造成儿童早熟风险。

现阶段人们常对人类尿液和血清中 BPA 进行检测,以此来评估 BPA 在人体内的暴露水平,研究发现微量 BPA 在机体内可被吸收代谢,迅速果糖化并快速代谢排泄^[61]。Mustieles 等^[62]研究发现,即使 BPA 摄入量低于安全剂量,大脑依然会遭受 BPA 的破坏,因此,基于近年 BPA 暴露量评估的文献研究,2021 年 12 月欧洲食品安全局将 BPA 的每日可耐受量改定为 0.04 ng/kg ^[54],以此降低人群

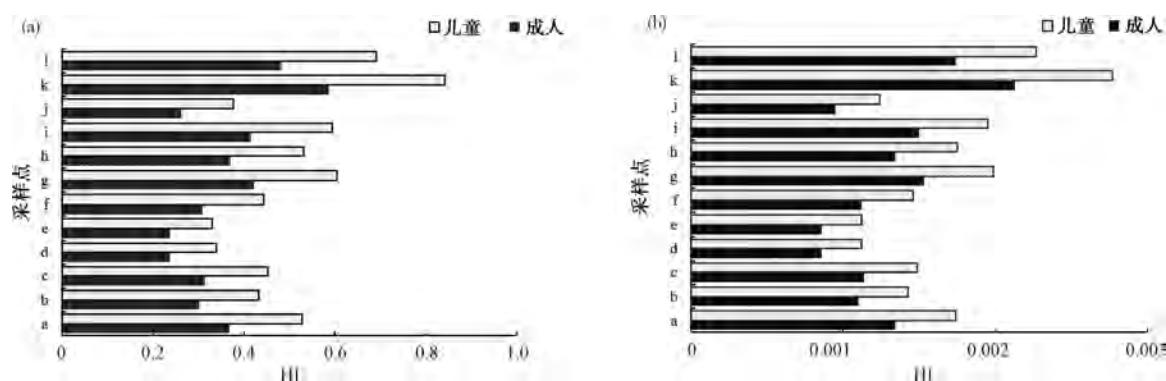


图5 某市环境水体中BPA经(a)饮水暴露、(b)皮肤暴露对成年人及儿童的健康风险

Fig. 5 Health Risks for Adults and Children from (a) Drinking Water Exposure and (b) Dermal Exposure to BPA in Environmental Water in a City

BPA暴露量并保护消费者健康。

从整体来看,我国污水处理过程中BPA暴露量评估结果低于国际上规定的暂定可耐受量,风险熵值较低,BPA的环境健康风险在可接受范围内,不会对人体健康产生危害^[39]。但BPA人体暴露具有低剂量、多途径、长期暴露的特点,且许多文献表明BPA具有遗传毒性^[63],重复暴露可能造成毒性累积^[64],存在潜在健康风险。未来需深入开展前瞻性流行病学研究,进一步明确低剂量BPA对人体健康的危害,对污水处理厂等污染物重要来源地的BPA加强风险评估与风险管理。

3 总结和展望

近年来,随着BPA排放量持续增多及应用领域的不断扩大,各类环境介质普遍检测出BPA^[21],其中城镇污水处理后的再生水与人类日常生活联系紧密。对污水处理中BPA的去除技术及去除效果进行归纳总结,结果如下。

(1)目前,污水处理过程中常用的BPA去除方法有物理吸附法、生物处理法和化学氧化法。其中生物处理法应用最为广泛,主要途径为污泥吸附和生物降解。不同污水处理工艺对BPA去除效果不一,活性污泥处理工艺中AAO工艺和OD工艺对BPA去除率可达80%以上,一体化污水处理工艺更先进合理,对BPA去除效果最好。

(2)对比污水处理厂在各级处理流程中BPA的去除效果可看出,多数污水处理厂对BPA的去除率达90%以上,一、二级处理过程对BPA去除率为60%~80%。部分污水处理厂在二级处理后加入深度处理工艺,可使BPA的去除效果达到90%左右,

提升了出水水质状况,对降低BPA环境健康风险具有重要作用。

(3)通过健康风险指数分析,现阶段污水处理后出水中BPA的环境健康风险在可接受范围内,对人体健康的危害可忽略不计。但人类日常生活长期暴露于BPA,可能会造成潜在的健康风险,今后还需进一步完善人体健康风险评估体系。

污水处理工艺对BPA处理效果起着决定性作用,为提高改善BPA去除效果,未来需深入研究BPA生物降解机理,发扬优势污水处理技术,强化深度处理工艺。同时定期做好水质监测工作,保障出水水质安全。现有环境健康风险分析研究^[54]表明,BPA暴露水平仍在可接受范围内,对人类健康不会造成严重危害,但我国缺乏BPA对人体暴露的相关毒理学数据^[65],评价结果不能全面反映BPA对人类的毒性及环境健康风险,其潜在危害不可低估。因此,加强低剂量长期BPA人体暴露的环境毒理学研究,及时完善调整BPA健康风险评价标准和评估方法,对准确把握BPA的环境健康风险和风险管理策略制定具有重要意义。

参考文献

- [1] 李红梅,熊忆茗,徐海明,等. 双酚A类似物的雄性生殖毒性研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2939-2945. LI H M, XIONG Y M, XU H M, et al. Research progress in male reproductive toxicity of bisphenol A analogues [J]. China Environmental Science, 2021, 41(6): 2939-2945.
- [2] MICHAŁOWICZ J. Bisphenol A—Sources, toxicity and biotransformation [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2014, 37(2): 738-758.
- [3] 李慧艳. 双酚A人群暴露情况和健康风险研究进展[J]. 中

- 国公共卫生, 2018, 34(10): 1442-1445.
- LI H Y. Human exposure to bisphenol A and its health risks: A review [J]. *China Public Health*, 2018, 34(10): 1442-1445.
- [4] ANDÚJAR N, GÁLVEZ-ONTIVEROS Y, ZAFRA-GÓMEZ A, et al. Bisphenol A analogues in food and their hormonal and obesogenic effects: A review [J]. *Nutrients*, 2019, 11(9): 2136. DOI: 10.3390/nu11092136.
- [5] 顾杰, 吉贵祥, 周林军, 等. 双酚 A 及其类似物的环境分布和毒性效应研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(8): 826-832.
- GU J, JI G X, ZHOU L J, et al. Research progress on environmental distributions and toxic effects of bisphenol A and its analogues [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2020, 37(8): 826-832.
- [6] 方超, 宁博, 范江霖, 等. 双酚 A(BPA)暴露对 WHHL 家兔糖类和脂类代谢的影响[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(1): 252-262.
- FANG C, NING B, FAN J L, et al. The effects of bisphenol A (BPA) exposure on the glucose and lipid metabolism in WHHL rabbit [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(1): 252-262.
- [7] 王强, 蔡玉娇, 郑月萍, 等. 双酚 A 对脂代谢和肥胖的影响及其机制的研究进展[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2014(4): 632-636.
- WANG Q, CAI Y J, ZHENG Y P, et al. Research advances in association of bisphenol A exposure with lipid metabolism and obesity [J]. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 2014(4): 632-636.
- [8] 孙丽聪, 庄太凤, 王硕, 等. 双酚 A 对人类生殖系统的影响及作用机制研究进展[J]. *山东医药*, 2021, 61(8): 85-88.
- SUN L C, ZHUANG T F, WANG S, et al. Research progress on the effects of bisphenol A on human reproductive system and mechanism of action[J]. *Shandong Medicine Journal*, 2021, 61(8): 85-88.
- [9] 江倩, 邹运韬, 陈慧梅. 双酚 A 与人类健康的研究进展[J]. *大连医科大学学报*, 2015(1): 97-100.
- JIANG Q, ZOU Y T, CHEN H M. Research progress of bisphenol A and human health [J]. *Journal of Dalian Medical University*, 2015(1): 97-100.
- [10] 吴琳嫒, 王溢, 宣栋樑, 等. 基于生物监测的孕期双酚 A 暴露对雌激素稳态的影响[J]. *中华疾病控制杂志*, 2022, 26(9): 1097-1101.
- WU L Y, WANG Y, XUAN D L, et al. Effects of exposure to bisphenol A on estrogen homeostasis based on the biomonitoring method in pregnant women [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2022, 26(9): 1097-1101.
- [11] MEEKER J D, CALAFAT A M, HAUSER R. Urinary bisphenol A concentrations in relation to serum thyroid and reproductive hormone levels in men from an infertility clinic [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1458-1463.
- [12] LI D K, ZHOU Z J, MIAO M H, et al. Urine, bisphenol-A (BPA) level in relation to semen quality [J]. *Fertil Steril*, 2011, 95(2): 625-630.
- [13] TANNER E M, HALLERBÄCK M U, WIKSTRÖM S, et al. Early prenatal exposure to suspected endocrine disruptor mixtures is associated with lower IQ at age seven [J]. *Environment International*, 2020, 134: 105185. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105185.
- [14] 杨丽华, 史奇朋, 周炳升. 双酚 A 对斑马鱼幼鱼神经递质和神经行为的影响[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3): 162-169.
- YANG L H, SHI Q P, ZHOU B S. Effects of bisphenol A on neurotransmitters and neurobehavior in juvenile zebrafish [J]. *Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(3): 162-169.
- [15] 吕琳, 董梦琦, 秦占芬. 低剂量双酚 A 影响哺乳动物神经发育研究现状及争议[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4864-4871.
- LÜ L, DONG M Q, QIN Z F. Research progress and controversy of low dose bisphenol A on neurodevelopment in mammals [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4864-4871.
- [16] 黄丹, 郝加虎. 双酚 A 暴露与儿童哮喘关系的研究进展[J]. *中国学校卫生*, 2022, 43(9): 1432-1435.
- HUANG D, HAO J H. Research progress on the relationship between bisphenol A exposure and childhood asthma [J]. *Chinese Journal of School Health*, 2022, 43(9): 1432-1435.
- [17] 贾玉庆, 谢同, 张丽平. 双酚 A 生产技术进展及市场分析[J]. *上海化工*, 2022, 47(2): 66-70.
- JIA Y Q, XIE T, ZHANG L P. Production technology progress and market analysis of bisphenol A [J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2022, 47(2): 66-70.
- [18] 生吉萍, 宿文凡, 张靖宇. 食品接触材料中双酚 A 暴露风险及风险管理[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(1): 167-174.
- SHENG J P, SU W F, ZHANG J Y. Risk analysis and management of dietary exposure to bisphenol A from food contact materials [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(1): 167-174.
- [19] 邓红梅, 梁春营, 陈永亨. 水环境中双酚 A 的污染及其生态毒理效应[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(7): 70-76.
- DENG H M, LIANG C Y, CHEN Y H. The research for distribution, transfer and ecotoxicology effect of bisphenol A in aquatic environment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(7): 70-76.
- [20] 施俭, 景澍闽, 向华. 膜盘固相萃取-LC-MS/MS 同时检测水中内分泌干扰物双酚 A 和雌激素[J]. *净水技术*, 2016, 35(3): 45-50, 110.
- SHI J, JING S M, XIANG H. Determination of bisphenol A and

- estrogens in water by disk solid phase extraction coupled with LC-MS/MS[J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(3): 45-50, 110.
- [21] 兰豪, 王媛, 黄家琰. 水中双酚 A 的光化学降解研究进展[J]. *工业水处理*, 2020, 40(9): 12-18.
LAN H, WANG Y, HUANG J Y. Recent advances in photochemical degradation of bisphenol A in water [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(9): 12-18.
- [22] 王燕春, 刘启凯, 赵庆祥. 双酚 A 的活性炭吸附特性[J]. *华东理工大学学报 (自然科学版)*, 2006, 32(4): 431-433, 479.
WANG Y C, LIU Q K, ZHAO Q X. Adsorption principles of biphenol-A by activated carbon [J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 32(4): 431-433, 479.
- [23] 赵俊明, 李咏梅, 周琪, 等. 双酚 A 在厌氧污泥上吸附行为的研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1681-1686.
ZHAO J M, LI Y M, ZHOU Q, et al. Sorption behavior of bisphenol A on anaerobic sludge [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1681-1686.
- [24] 王捷, 何玉倩, 张宏伟, 等. 双酚 A 在膜生物反应器中的去除及转化分析[J]. *水处理技术*, 2012, 38(7): 41-44, 48.
WANG J, HE Y Q, ZHANG H W, et al. Bisphenol A removal and biodegradation in MBR [J]. *Water Treatment Technology*, 2012, 38(7): 41-44, 48.
- [25] 叶林静, 关卫省, 李宇亮. 高级氧化技术降解双酚 A 的研究进展[J]. *化工进展*, 2013, 32(4): 909-918.
YE L J, GUAN W S, LI Y L. Research advances in bisphenol A degraded by advanced oxidation processes [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(4): 909-918.
- [26] CHEN P J, KARL G, DAVID E, et al. Biological assessment of bisphenol A degradation in water following direct photolysis and UV advanced oxidation[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(7): 1094-1102.
- [27] 王雪, 车晶, 武敏, 等. 双酚 A 电化学氧化及表面活性剂抗电极钝化研究[C]. 西安: 中国化学会第十三届全国分析化学年会论文集(一), 2018.
WANG X, CHE J, WU M, et al. Study on electrochemical oxidation of bisphenol A and anti-electrode passivation by surfactants [C]. Xi'an: Proceedings of the 13th Annual National Conference on Analytical Chemistry of the Chinese Chemical Society (I), 2018.
- [28] 魏俊富, 陈玉蝶, 金戈, 等. 吸附与生物降解耦合工艺对双酚 A 的强化去除效果[J]. *天津工业大学学报*, 2021, 40(6): 35-40, 46.
WEI J F, CHEN Y D, JIN G, et al. Enhanced removal effect of bisphenol A by coupling adsorption and biodegradation [J]. *Journal of Tianjin University*, 2021, 40(6): 35-40, 46.
- [29] 王洪臣. 活性污泥工艺的技术现状及发展趋势[J]. *城镇供水*, 2008(6): 4-8.
WANG H C. Current situation and development trend of activated sludge technology [J]. *City and Town Water Supply*, 2008(6): 4-8.
- [30] ZHANG H F, ZHANG Y P, LI J B, et al. Occurrence and exposure assessment of bisphenol analogues in source water and drinking water in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 607-613. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.053.
- [31] 周开茹, 龚剑, 熊小萍, 等. 污水处理厂中典型内分泌干扰物的去除效果研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1732-1740.
ZHOU K R, GONG J, XIONG X P, et al. Remove of typical endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment plants [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2018, 27(9): 1732-1740.
- [32] 任仁, 陈明. 城市污水处理厂水样中烷基酚、双酚 A 残留分析[C]. 北京: 第三届全国环境化学学术大会论文集, 2005.
REN R, CHEN M. Analysis of alkyl phenol and bisphenol A residues in water samples from municipal wastewater treatment plants [C]. Beijing: Proceedings of the Third National Conference on Environmental Chemistry, 2005.
- [33] 杨飞, 喻泽斌, 高丽红, 等. 南宁某污水厂各处理单元中典型 EDCs 的分布[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(19): 72-74.
YANG F, YU Z B, GAO L H, et al. Distribution of typical endocrine disrupting chemicals in treatment units of a wastewater treatment plant in Nanning [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(19): 72-74.
- [34] 杜兵, 张彭义, 张祖麟, 等. 北京市某典型污水处理厂中内分泌干扰物的初步调查[J]. *环境科学*, 2004, 25(1): 114-116.
DU B, ZHANG P Y, ZHANG Z L, et al. Preliminary investigation on endocrine disrupting chemicals in a sewage treatment plant of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 114-116.
- [35] 丁洁, 张圣虎, 刘济宁, 等. 液相色谱-串联质谱法测定污水处理厂水样中双酚 A、四溴双酚 A 及烷基酚类化合物[J]. *色谱*, 2014(5): 529-534.
DING J, ZHANG S H, LIU J N, et al. Determination of bisphenol A, tetrabromobisphenol A and alkylphenols in water samples of sewage treatment plant using liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chromatography*, 2014(5): 529-534.
- [36] 吴蔓莉, 时艺馨, 李炜, 等. 高效液相色谱-二极管紫外阵列/荧光串联测定雌激素的方法及污水处理厂对雌激素的去除特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2614-2620.
WU M L, SHI Y X, LI W, et al. High performance liquid chromatography coupling with photo-diode array and fluorescence detector for sensitive analysis of environmental endocrine disruptors (EDCs) in wastewater [J]. *Chinese Journal of*

- Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2614–2620.
- [37] SUN Q, LI M Y, MA C, et al. Seasonal and spatial variations of PPCP occurrence, removal and mass loading in three wastewater treatment plants located in different urbanization areas in Xiamen, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 208: 371–381. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.10.003.
- [38] 薛桥. 不同工艺污水处理系统中酚类内分泌干扰物分布特性与环境归趋的研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- XUE Q. Study on distribution characteristics and environmental tendency of phenolic endocrine disruptors in sewage treatment systems of different processes[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [39] 朱艺文. 上海市 WWTPs 内分泌干扰物测试方法建立及风险评估[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020.
- ZHU Y W. Establishment and risk assessment of test methods for endocrine disruptors of WWTPs in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University of Technology, 2020.
- [40] 何增浩. 污水处理厂不同工艺段对双酚类物质的去除探讨[D]. 保定: 河北大学, 2020.
- HE Z H. Discussion on removal of bisphenols in different process sections of sewage treatment plant [D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [41] 周海东, 徐菲, 刘建波, 等. 城市污水中 EDCs 的活性污泥法去除特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014(4): 60–64.
- ZHOU H D, XU F, LIU J B, et al. Study on characteristics of removing endocrine-disrupting compounds in sewage by activated sludge process [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014(4): 60–64.
- [42] THOMPSON K, ZHANG J Y, ZHANG C L. Use of fugacity model to analyze temperature-dependent removal of micro-contaminants in sewage treatment plants [J]. Chemosphere, 2011, 84(8): 1066–1071.
- [43] NIE Y, QIANG Z, ZHANG H Q, et al. Fate and seasonal variation of endocrine-disrupting chemicals in a sewage treatment plant with A/A/O process [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 9–15. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.01.030.
- [44] CLARA M, STRENN B, GANS O, et al. Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2005, 39(19): 4797–4807.
- [45] 唐玉霖, 吴浩伟, 杨欣, 等. 复合碳材料制备及其吸附双酚 A 效能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(12): 103–111.
- TANG Y L, WU H W, YANG X, et al. Study on preparation of composite carbon material and adsorption performance of bisphenol A [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2021, 48(12): 103–111.
- [46] 王坤, 赵玉杰, 庄涛. 生活垃圾渗滤液中 43 种新兴有机污染物分布特征与环境风险[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(12): 1523–1530.
- WANG K, ZHAO Y J, ZHUANG T. Distribution and environmental risks of 43 emerging contaminants in municipal solid waste leachate [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(12): 1523–1530.
- [47] 孙震, 郭铮蕾, 刘莉, 等. 双酚 A 国内外管控法规和检测方法研究进展[J]. 中国口岸科学技术, 2022, 4(2): 38–44.
- SUN Z, GUO Z L, LIU L, et al. Research progress on control regulations and detection technologies related to bisphenol A at home and abroad [J]. China Port Science and Technology, 2022, 4(2): 38–44.
- [48] 程宇凯, 魏亮亮, 宋悦, 等. AO 及 AAO 污水处理工艺单元运行能耗分析及节能运行策略[J]. 广东技术师范学院学报, 2015, 36(2): 12–16.
- CHENG Y K, WEI L L, SONG Y, et al. Unit energy consumption analyzing and saving-energy strategies for the operation of AO and AAO wastewater treatment systems [J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University, 2015, 36(2): 12–16.
- [49] 殷伟, 范德玲, 汪贞, 等. 天津市地表水体与沉积物中 7 种高关注酚类化合物的污染特征与生态风险分析[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 230–241.
- YIN W, FAN D L, WANG Z, et al. Pollution characteristics and ecological risks of 7 phenolic compounds of high concern in the surface water and sediments of Tianjin, China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(1): 230–241.
- [50] 王浩. 双酚 A 类物质在市政污水处理厂中的去除机理及人体暴露分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- WANG H. Removal mechanism and human exposure analysis of bisphenol A substances in municipal sewage treatment plants [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [51] RONEN Z, ABELIOVICH A. Anaerobic-aerobic process for microbial degradation of tetrabromobisphenol A [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(6): 2372–2377.
- [52] 王梓松. 内分泌干扰物双酚 A 在饮用水处理过程中的典型行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- WANG Z S. Typical behavior of endocrine disruptor bisphenol A in drinking water treatment [D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [53] 肖翔. 市政污水处理工艺与污水深度处理回用技术[J]. 中国高新科技, 2022(21): 124–125.
- XIAO X. Municipal sewage treatment process and sewage advanced treatment and reuse technology [J]. China High-Tech Journal, 2022(21): 124–125.
- [54] 李晓珩. MXC, BPA 联合暴露对斑马鱼胚胎及精子活性的毒性研究[D]. 温州: 温州医科大学, 2011.

(下转第 62 页)

- 方式及其碳排放核算:以芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
- HAO X D, ZHAO Z C, LI J, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857.
- [43] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.
- HAO X D, FANG X M, LI J, et al. Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 11-16.
- [44] HAO X D, LI J, LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: Heat over organics[J]. Water Research, 2019, 161: 74-77. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.106.
- [45] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2404-2412.
- WANG L, LI D B, LIU Z W, et al. Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2404-2412.
- [46] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 65-74.
- ZHANG Y, GE T G, SUN Y L, et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74.
- [47] 谢菲. 水厂电耗节约方法研究与创新[J]. 城镇供水, 2020(6): 27-30, 55.
- XIE F. Research and innovation of power consumption saving methods in waterworks[J]. City and Town Water Supply, 2020(6): 27-30, 55.
- [48] 崔玉川. 给水处理设施设计计算[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- CUI Y C. Design and calculation of water treatment facilities [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- (上接第 28 页)
- LI X H. Toxicity of MXC, BPA combined exposure on zebrafish embryo and sperm motility [D]. Wenzhou: Wenzhou Medical University, 2011.
- [55] 朱暖飞. 环境中典型双酚类化合物的免疫分析方法构建、污染调查与风险评估研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- ZHU N F. Construction of immunoassay method, pollution investigation and risk assessment of typical bisphenol compounds in the environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [56] VANDENBERG L N. Human exposure to bisphenol A (BPA) [J]. Reproductive Toxicology, 2007, 24(2): 139-177.
- [57] YANG C F, KARMAUS W J J, YANG C C, et al. Bisphenol A exposure, DNA methylation, and asthma in children [J]. International Journal Environment Research Public Health, 2020, 17(1): 298. DOI: 10.3390/ijerph17010298.
- [58] 谢娜妹, 王慧, 王舜钦. 双酚 A 暴露对儿童健康影响的研究进展[J]. 中国妇幼保健, 2022, 37(8): 1539-1542.
- XIE N M, WANG H, WANG S Q. Research progress on the effects of bisphenol A exposure on children's health [J]. Maternal and Child Health Care of China, 2022, 37(8): 1539-1542.
- [59] 徐耿. 童年期双酚 A 暴露对女童青春前期发育提前的影响[J]. 中国儿童保健杂志, 2016, 24(7): 719-722.
- XU G. Effects of childhood BPA exposure on early pubertal development in girls[J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2016, 24(7): 719-722.
- [60] 戴晖, 朱小琴, 罗淑红. 女童性早熟与环境内分泌干扰素的相关性研究[J]. 中国性科学, 2017, 26(6): 58-60.
- DAI H, ZHU X Q, LUO S H. Correlation of precocious puberty and environmental endocrine disruptors [J]. Chinese Journal of Human Sexuality, 2017, 26(6): 58-60.
- [61] 周琴. 双酚 A 对男性生殖功能的影响及机制探讨[D]. 太原: 山西医科大学, 2013.
- ZHOU Q. Effect and mechanism of bisphenol A on male reproductive function[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2013.
- [62] MUSTIELES V, FERNÁNDEZ M F. Bisphenol A shapes children's brain and behavior: Towards an integrated neurotoxicity assessment including human data [J]. Environmental Health, 2020, 19(1): 66. DOI: 10.1186/s12940-020-00620-y.
- [63] 李蕊瑞, 李晓蒙, 陈锦瑶. 双酚 A 的遗传毒性及其作用模式[J]. 卫生研究, 2021, 50(2): 353-357.
- LI R R, LI X M, CHEN J Y. Genotoxicity and mode of action of bisphenol A[J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(2): 353-357.
- [64] 王冲, 徐立. 双酚 A 的表观遗传作用机制研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(8): 744-747.
- WANG C, XU L. Effects of bisphenol A on epigenetics: A review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(8): 744-747.
- [65] 苏贝, 张琳钰, 陈玲, 等. 市政尾水中环境雌激素对水生态健康的影响[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(5): 91-102.
- SU B, ZHANG L Y, CHEN L, et al. Effect of environmental estrogens in the effluent of municipal wastewater treatment plants on water ecological health [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(5): 91-102.