

吸附材料去除水中有机污染物的研究进展

徐丽娟¹, 郭晓艳², 杨婕¹, 陶琼¹, 刘作康¹, 张芬芬¹, 陈庆国^{1*}

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江舟山 316022; 2. 莱州出入境检验检疫局综合技术服务中心, 山东烟台 261411)

摘要 综述了吸附材料对水中有机污染物去除的研究进展, 介绍了典型的黏土矿物类、工业废渣类、生物类、活性炭类、树脂类及复合材料吸附剂等的研究现状, 并对吸附法处理水中有机物的应用前景进行了展望。

关键词 吸附材料; 吸附剂; 水处理; 有机物

中图分类号 S181; X52 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)33-0044-05

Research Progress on Removal of Organic Pollutants in Water by Adsorption Material

XU Li-juan¹, GUO Xiao-yan², YANG Jie¹, CHEN Qing-guo^{1*} et al (1. College of Marine Science & Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022; 2. Comprehensive Technical Service Center, Laizhou Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Yantai, Shandong 261411)

Abstract Adsorption materials applied for organic pollutants removal in water were summarized in this paper, the typical adsorption materials of clay minerals, industrial wastes, biological materials, activated carbons, resins, and composite adsorbents based on composite materials were mainly introduced, and the application prospect of adsorption methods for organic matter treatment in water was also outlooked.

Key words Adsorption material; Adsorbent; Water treatment; Organic pollutant

对于废水中有机污染物的去除, 吸附法是重要方法之一。吸附去除有机物主要是指利用固体吸附剂的物理和化学吸附性能, 通过富集有机物至吸附剂中达到去除或降低水中有机物的过程^[1]。吸附法去除水体中的有机物具有处理效率高、去除效果好、应用范围广等特性, 已成为水体中各类有机物去除的首选方法之一。而吸附法应用的关键是选择适宜的吸附剂^[2]。笔者在已有研究报道的基础上介绍了目前在水处理领域广泛应用的吸附剂种类, 总结了各类吸附剂对水中有机物去除的研究与应用现状, 以期对新型水处理吸附剂的开发与应用提供参考。

1 水处理吸附剂种类

根据来源, 可将水中有机物去除吸附剂分为天然吸附剂与人工合成吸附剂。按照种类分, 主要有黏土矿物类、工业废渣类、生物类、活性炭类、树脂类、硅胶类及复合材料吸附剂等^[3]。表1列出了文献报道水处理中常见的有机物吸附剂。

2 黏土矿物类吸附剂

天然黏土矿物在自然界中广泛存在且种类繁多, 文献已报道用于水处理的天然黏土矿物主要有高岭土、膨润土、硅藻土、沸石、坡缕石及活性氧化铝等。由于其具有铝硅酸盐晶体结构, 热稳定性高, 比表面积大, 且内部多孔可选择性吸附分子能有效吸附水中极性、分子直径小的溶解性有机物, 是一种优良的有机废水处理吸附剂。天然黏土矿物在使用过程中难以满足各种环境需求, 因此黏土矿物类改性与改性技术得到了迅速发展。黏土矿物改性技术包括焙烧法、酸化法、碱化法、氧化剂法、无机法、有机法等^[5-7]。

基金项目 浙江省自然科学基金(LY14D060003; LQ14D060002); 浙江省公益性项目(2016C33054); 舟山市科技计划项目(2014C11006; 2014C41004); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2015R411001)。

作者简介 徐丽娟(1995-), 女, 浙江南浔人, 本科生, 专业: 环境工程。
* 通讯作者, 副教授, 博士, 从事水污染治理与资源化利用研究。

收稿日期 2016-09-30

表1 水处理中典型的有机物吸附剂

Table 1 Typical organic adsorbent in water treatment

常见种类 Common category	已报道吸附剂 Reported adsorbent	处理对象 Processing object	文献出处 Source of reference
黏土矿物类 Clay minerals	高岭土	城市生活污水	沈王庆等 ^[4]
	膨润土	含酚废水	聂锦旭等 ^[5]
	硅藻土	含亚甲基蓝和孔雀石绿染料废水	孙玉焕等 ^[6]
	沸石	碱性染料废水	Meshko等 ^[7]
工业废渣类 Industrial wastes	坡缕石	直接大红废水	郝艳玲等 ^[8]
	活性氧化铝	草甘膦生产废水	彭波等 ^[9]
	煤矸石	洗浴废水	吴俊峰等 ^[10]
	活化煤粉煤灰	印染废水	郭丽等 ^[11]
生物类 Biological materials	赤泥	印染废水	Ahmaruzzaman ^[12]
	农林废弃物	有机废水	Gupta等 ^[13]
	壳聚糖	染料活性黑5废水	张棋等 ^[14]
活性炭类 Activated carbons	活性污泥	甲苯废水	Saha等 ^[15]
	活性炭	原水中有有机物	方平等 ^[16]
	碳纳米管	三氯甲烷废水	朱文发等 ^[17]
	有序介孔碳	大分子染料废水	Lu等 ^[18]
树脂类 Resins 复合吸附剂	生物质炭	4-硝基甲苯溶液	Xin等 ^[19]
	石墨烯	亚甲基蓝废水	陈宝梁等 ^[20]
	大孔树脂	渗滤液中有有机物	Liu等 ^[21]
Composite adsorbents	壳聚糖复合材料	工业废水	陆小青等 ^[22]
	硅胶基复合材料	饮用水中狄氏剂	冯辉霞等 ^[23]
	聚氨酯复合材料	苯酚废水	霍金仙 ^[24]
	石墨烯基复合材料	苯酚废水	毛宁 ^[25]
		磺胺类抗生素废水	Wu等 ^[26]

沈王庆等^[4]运用碳酸钠活化煤系高岭土吸附处理城市生活污水, 结果表明, 其对污水中有机物以化学吸附为主, 在吸附时间2 h、液固比60 mL/g、pH 6的条件下, 吸附效率达到最大。郑敏等^[27]用硫酸铝和活性炭高温焙烧改性高岭土, 探究改性高岭土对含油废水的吸附性能, 结果表明, 改性高岭土对废水中柴油的去除率高达99%。天然膨润土中因表面硅氧结构亲水性, 使其表面存在一层薄水膜, 限制其吸附疏水性有机污染物。聂锦旭等^[5]利用氯化铝为改性剂对

膨润土进行改性,探讨了改性膨润土对含酚废水中苯酚的去除影响因素,结果表明,在改性膨润土投量为 4 g/L、pH 8.5、吸附 30 min 的条件下,对苯酚去除率达 92.2%。天然硅藻土对甲基蓝、活性黑、活性金黄等染料均有较好的吸附效果^[28-30]。孙玉焕等^[6]研究了十二烷基硫酸钠改性硅藻土对亚甲基蓝和孔雀石绿染料废水吸附处理,改性硅藻土对亚甲基蓝脱色率最高可达 71%,对亚甲基蓝饱和和吸附容量为 65.8 mg/g;改性硅藻土对孔雀石绿处理脱色率为 85%,对孔雀石绿饱和和吸附容量为 232.6 mg/g。Meshko 等^[7]研究表明,天然沸石能有效吸附碱性染料。何少华等^[31]研究表明,天然沸石可有效去除水中氨氮与有机污染物。陈辅强^[32]研究发现,有机物与氨氮共存会影响天然沸石对氨氮的吸附。杨浠羽等^[33]研究了温度、酸、碱、盐对沸石改性的影响,结果表明,0.5 mol/L NaCl 改性沸石对 COD 的去除率最高。Kuleyin^[34]研究表明,表面活性剂改性后,沸石对氯苯酚吸附能力优于苯酚。苏银银^[35]以聚乙烯胺改性沸石,研究了其对活性染料的吸附行为,结果表明,该吸附剂对阴离子染料废水有很好的净化能力。Chao 等^[36]利用十八烷基三氯硅烷对沸石进行改性,并研究改性和未改性分子筛对苯、丙基苯等的吸附能力,研究发现,改性后沸石对有机化合物吸附能力显著增强,且改性后沸石吸附有机物浓度范围更宽泛。坡缕石黏土属于层链状镁铝硅酸盐纤维状晶体黏土矿物,比表面积大且内部多孔,具有良好的吸附性能^[37]。郝艳玲等^[8]用氧化铝对坡缕石进行包覆改性,通过静态吸附试验研究了改性坡缕石吸附直接大红的特性,结果表明,改性坡缕石对直接大红的吸附作用较改性前明显提高,在中性 pH、吸附剂用量为 2.0 g/m³ 时,对直接大红的吸附率达 90% 以上。活性氧化铝多孔吸附材料具备高温热稳定性好、比表面积大、吸附性能好等优点,被广泛用于化工等工业中作为吸附剂、干燥剂及催化剂载体,也被研究者用于工业废水处理中。彭波等^[9]利用活性氧化铝处理草甘膦生产废水,结果表明,活性氧化铝对该废水具有良好的处理效果,在原废水中草甘膦质量浓度为 10 g/L, COD 高达 30 g/L 时,活性氧化铝对草甘膦的去除率大于 98%, COD 去除率大于 50%。

3 工业废渣类吸附剂

煤矸石是指煤炭开采等过程中产生的固体废弃物,具有碳、硅、铝共存矿物特性,对其进行活化,可制备出吸附性能优良的吸附剂。吴俊峰等^[10]利用改性煤矸石吸附预处理洗浴废水,考察了改性煤矸石对废水的处理效果,结果表明,在废水 COD 为 262.4 mg/L 时,改性煤矸石与废水混合 2 h,处理后出水 COD 去除率可达 62%~79%。活化煤是以劣质煤为原料,经破碎、筛选、浸泡、接种等工艺制成的一种新型优质水处理滤料。郭丽等^[11]以活化煤作为三级处理手段处理印染废水,结果表明,印染废水 COD 去除率超过 60%,色度去除率在 70% 左右。粉煤灰是燃煤电厂排出的废弃物,由很多具有不同结构和形态微粒组成,其中大多数是玻璃球体,具有多孔结构,比表面积大,一般为 2 500~5 000 m²/g,具有较强的吸附能力^[38]。Ahmaruzzaman^[12]研究表明,粉煤

灰对高苯酚含量废水去除效果极好,可使苯酚浓度降低 94%。可用双氧水对饱和粉煤灰进行再生循环利用,降低处理成本。赤泥是氧化铝生产过程中铝土矿经强碱浸出时形成的不溶残渣,具有胶结孔架状结构,比表面积高达 40~70 m²/g,在水中稳定性较好,是一种优良的低成本吸附剂^[39]。Namasivayam 等^[40]对赤泥吸附印染废水中刚果红进行研究,结果表明,赤泥对刚果红吸附效果较好,吸附容量可达 4.05 mg/g。赤泥对印染废水中染料吸附过程均为放热过程,任何对赤泥改性包括热处理、酸处理和氧化处理都会影响赤泥的吸附效能^[41]。

4 生物类吸附剂

生物类吸附剂包括微生物、藻类、动植物碎片、生物系统等生物有机体及生物可产生淀粉、蛋白质、纤维素、壳聚糖等。其中,文献报道常用于水处理的生物类吸附剂有农林废弃物、壳聚糖及生活污水处理产生的活性污泥^[3]。

农林废弃物主要有农作物秸秆、稻壳、甘蔗渣、花生壳、橘皮等。这些材料富含纤维素和木质素等天然高分子,分子链上分布有大量羟基、羧基等活性基团,对水体中污染物具有良好的絮凝及络合吸附作用。与其他水处理剂相比,这些物质具有来源广、无毒以及环境友好等特点。通过适当改性引进新功能基团,可进一步加强其应用性能。对农林废弃物进行改性的方法有焙烧、水解、接枝共聚、醚化以及酯化作用等^[42-43]。Gong 等^[44]采用磷酸对稻草秸秆进行改性,考察了该吸附剂对碱性蓝和碱性红的吸附能力,结果表明,改性后稻草秸秆吸附剂具有优良的吸附性能,当改性吸附剂用量为 2.0 g/L 时,对 50~350 mg/L 2 种碱性染料去除率均可达 96% 以上。谢杰等^[45]研究发现,经碱洗处理后稻壳灰可以用来吸附污水中有机物,吸附效果受 pH 影响,当 pH 为 7 时,吸附苯酚的效果最好。Sivaraj 等^[46]研究了柑橘皮对水溶液中酸性紫 17(酸性染料)的吸附效果,结果表明,柑橘皮可作为废水中酸性紫 17 的吸附剂,吸附过程符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附曲线。pH 影响对酸性紫 17 的去除,原因可能是碱性介质中 OH⁻ 会与染料阴离子竞争吸附活性点。

壳聚糖作为一种来源广泛且无毒无害的高分子聚合物,在水处理应用中备受重视。Bratskaya 等^[47]将壳聚糖谷氨酸盐用于处理饮用水,试验证明,壳聚糖盐能有效去除水中溶解性腐质酸及有机物。李海丰等^[48]将壳聚糖应用于印染废水、地下水及饮用水的处理中,研究发现其吸附效果良好,是一种理想的吸附剂。Saha 等^[15]研究了壳聚糖对废水中染料活性黑 5 的吸附效果,结果表明,壳聚糖的吸附能力随着 pH 的下降而升高, pH 为 5 时出现最大吸附量 39.5 mg/g, pH 为 9 时出现最小吸附量 12.5 mg/g。

城市污水处理过程中产生的活性污泥是一种有孔结构和胞外聚合物絮体,较大的比表面积和大量的微生物与有机物使其含有大量官能团,这使得活性污泥对水中污染物具有良好的吸附能力。用污泥制作吸附剂的方法主要包括污泥热解、气体物理活化及化学试剂活化等^[49]。方平等^[16]采用改进 ZnCl₂ 活化法制备污泥含炭吸附剂,污泥含炭吸附剂对

中低浓度甲苯 ($< 2\ 700\ \text{mg}/\text{m}^3$) 具有很好的吸附能力, 该吸附剂可在常温和有有机物浓度较低的条件下来部分替代活性炭的使用。有研究表明, KOH 是最有效的化学活化剂。Lillo-ródenas 等^[50] 研究表明, KOH 活化法制得的吸附剂比表面积最高, 可达到 $1\ 882\ \text{m}^2/\text{g}$ 。污泥吸附剂广泛应用于水相吸附, 对染料、酚类化合物均有较好的去除效果。但污泥吸附剂在使用过程中重金属等有害物质溶出也是必须考虑的问题, 如何针对不同应用要求寻求更加经济高效的污泥吸附剂制作方法是今后面临的挑战。

5 活性炭类吸附剂

活性炭具有发达的孔隙结构, 极大的比表面积和丰富的表面官能团, 对有机物具有良好的吸附去除效果。针对酚类、苯胺类等芳香有机物, 活性炭吸附被美国环境保护署 (EPA) 推荐为最佳污染防治技术, 被广泛应用于废水处理、饮用水处理和地下水环境修复等方面^[51]。刘通等^[52] 用活性炭对生化出水中有机物进行分离研究, 结果表明, 活性炭主要吸附小分子有机物, 吸附效果良好, 对溶解有机物去除率可达到 54%。朱文发等^[17] 用活性炭吸附原水中有机污染物, 效果明显, 出水 COD_{Mn} 平均仅为 $0.95\ \text{mg}/\text{L}$, 对总有机碳去除率为 34.9%。随着科技的进步, 越来越多的新技术应运而生。邱峰等^[53] 将磁化技术引入吸附过程, 考察了磁场处理对活性炭吸附硝基苯等 5 种有机物的影响, 结果表明, 预磁处理可提高活性炭对硝基苯和苯甲酸的吸附容量。王丁明等^[54] 研究了活性炭吸附组合工艺应用及发展, 其中包括臭氧-活性炭组合工艺、高锰酸钾-活性炭组合工艺、生物活性炭法、粉末活性炭-活性污泥组合工艺、活性炭-超滤组合工艺、活性炭电解法。吴光前等^[55] 将前人对活性炭表面改性的研究进行了总结。关于改性活性炭对有机物吸附的研究很多, 研究均证明, 改性活性炭的吸附性能得到提高。虽然活性炭应用广泛, 但其制备条件苛刻、再生费用高、不同原料与活化条件下制得的活性炭吸附性能差别很大、吸附性能易受吸附质性质和吸附条件等因素影响等缺点^[56-57]。

碳纳米管比表面积大、表面活性高、具有网状微孔通道, 被广泛用作吸附剂。目前有关碳纳米管对有机物吸附机理的研究主要集中于疏水作用、 $\pi-\pi$ 键作用、H 键作用、静电作用力等。由于碳纳米管在吸附有机物时, 以上几种作用力可能同时存在, 因此吸附物质不同, 起主导作用的吸附机理不同^[58]。Lu 等^[18] 研究了碳纳米管对水溶液中三卤甲烷的吸附情况, 比较了与粉末状活性炭吸附三卤甲烷的差异, 用酸化纯化过碳纳米管更有利于吸附。Gotovac 等^[59] 对比了 2 种不同直径单壁碳纳米管对萘的吸附效果, 结果表明, 直径大单壁碳纳米管有利于萘分子吸附。萘在单壁碳纳米管表面存在着很强的吸附作用, 是一种比活性炭更为高效的新型吸附剂。但碳纳米管制作成本较高, 如何降低碳纳米管制作成本及优化改性方法还需要进一步研究。

有序介孔碳比表面积和孔体积较大, 因此其具有良好的吸附性能, 而且它比活性炭的吸附容量大, 重复再生利用率

也高得多。其孔径比活性炭孔径大, 因此主要用来吸附大分子有机物 (染料大分子、芳香有机化合物等)^[60]。Xin 等^[19] 以表面活性剂 F127 为模板, 用酚醛树脂做碳源, 合成有序介孔碳, 用来吸附水中大分子染料, 结果表明, 这种有序介孔碳对染料的吸附容量是普通活性炭 2 倍, 染料浓度较低时, 吸附效果更好, 吸附效率高达 99%。吸附后介孔碳还可重复利用。崔祥婷等^[61] 以三嵌段共聚物 F127 为导向剂, 甲阶酚醛树脂为碳源, 通过 EISA 方法合成有序介孔碳材料, 处理水相中的对氯苯酚, 发现低浓度水中对氯苯酚被全部去除, 效果远好于微孔活性炭吸附剂。也可在有序介孔碳合成中加入其他金属元素, 如铁、钴等^[62], 以增加其对某些特定有机物的吸附容量。

生物质炭是由生物质在无氧或缺氧条件下经过高温裂解、炭化而产生的一类高度芳香化、难溶性固态物质。环境中普遍存在的生物炭质 (如木炭、焦炭等) 具有超强吸附性能^[63]。陈宝梁等^[20] 以松针为生物质代表, 通过控制不同炭化温度 ($100\sim 700\ ^\circ\text{C}$), 制备了一系列生物炭质吸附剂, 表征了其结构和表面特征。结果表明, 生物炭质吸附剂芳香性随炭化温度的升高而急剧增加、极性指数急剧降低, 逐渐从“软炭质”过渡到“硬炭质”, 同时其比表面积迅速增大。生物炭质吸附剂对水中 4-硝基甲苯具有很强的吸附能力。

石墨烯是一种由 sp^2 杂化碳原子以六边形排列形成的周期性蜂窝状二维碳质新材料, 理论比表面积高达 $2\ 630\ \text{m}^2/\text{g}$, 具有很强的吸附性能, 且价格较低廉, 制备过程简单, 可用于水中有机物吸附的去除^[64]。Liu 等^[21] 研究了不同环境条件 (pH、吸附时间、吸附温度、污染物浓度) 下石墨烯对亚甲基蓝的吸附, 结果表明, 石墨烯对亚甲基蓝吸附等温线符合 Langmuir 模型, 最大吸附容量达 $153.85\ \text{mg}/\text{g}$ 。

6 树脂类吸附剂

大孔吸附树脂是一类不含离子交换基团, 具有大孔结构的高分子吸附剂, 理化性质稳定, 不溶于酸、碱及有机溶剂, 具有网状结构和高比表面积, 因此对有机物具有富集吸附作用, 且不受无机盐类等干扰, 其吸附性能与活性炭相似, 吸附与范德华力或氢键有关^[65]。陆小青等^[22] 进行了大孔树脂优化试验, 结果表明, H103 树脂在 pH 为 2、投加量为 $0.3\ \text{g}$ 、震荡时间为 48 h 的条件下去除效率最高, 且其对渗滤液中可溶性有机物去除率达 65.1%。朱桂琴等^[66] 研究了 H-103 大孔吸附树脂处理苯甲酸废水处理工艺, 结果表明, 最佳洗脱条件下, 静态吸附后苯甲酸的去除率为 78.7%, 动态吸附后其去除率为 99.98%, 树脂反复使用性能良好。庞建峰等^[67] 利用 H103 大孔树脂作为萃取之后二级处理反应器处理苯胺废水, 结果表明, 出水中 COD 和苯胺质量浓度分别降至 100 和 $5\ \text{mg}/\text{L}$ 以下, 去除率分别达 92.00% 和 95.00%。张海珍等^[68] 研究了不同条件下 XDA-200 大孔树脂对水溶液中苯酚的吸附行为, 结果表明, 该树脂对水溶液中苯酚的吸附速率很快, 180 min 可达到平衡; 树脂对水中苯酚吸附量随其初始浓度的增加而增加, 呈线性关系; pH 和温度降低, 有利于树脂吸附苯酚。

7 复合吸附剂

由于单一吸附剂的吸附作用范围较窄,一般只适用于特定类有机物,且吸附效果不理想。随着杂化材料的研究发展,无机/无机、无机/有机及无机聚合物复合材料制备和性能研究进展很快。各种材料复合,一方面改善了材料的原有性能,另一方面又赋予复合材料新功能^[69]。冯辉霞等^[23]研究表明,壳聚糖与黏土、二氧化硅、无机高分子絮凝剂及其他无机材料复合,大大提高了壳聚糖对水中有机物的吸附性能。霍金仙^[24]以硅胶为载体,外包覆内嵌三油酸甘油酯醋酸纤维素复合膜,合成了类脂复合吸附剂,并考察了吸附剂对狄氏剂的等有机物的吸附效能,结果表明,复合吸附剂对狄氏剂的去除效能与三油酸甘油酯含量正相关,能够有效去除水中 ng 级浓度狄氏剂。毛宁^[25]合成聚氨酯/活性炭复合材料,研究了该聚氨酯基复合材料对苯酚废水的吸附效果,该过程是单分子层吸附,当初苯酚浓度为 100 mg/L 时,半吸附时间仅为 26.77 min。Wu 等^[26]研究了 3 种具有磁性还原氧化石墨烯与氧化铁混杂材料对医院含磺胺类抗生素废水的吸附性能进行研究,结果表明,3 种石墨烯材料对磺胺去除率均可达 90.00%,磺胺含量为 1~200 ng/mL 时,吸附量呈现线性吸附特征。

8 展望

吸附法是净化有机物的方法之一,与其他方法相比,吸附法种类多、操作简便,技术发展成熟。但是如何选择最优吸附条件,提高吸附剂吸附性能,如何扩大附剂应用范围,吸附剂绿色处置等问题仍亟待进一步解决。开发新型、高效、经济、绿色、环保的吸附剂将成为未来发展的趋势。

参考文献

- [1] 邓勤. 水处理吸附剂的研究进展[J]. 钦州学院学报, 2010, 25(3): 19-22.
- [2] 刘转年, 金奇庭, 周安宁. 废水的吸附法处理[J]. 水处理技术, 2003, 29(6): 318-322.
- [3] 庞秋云. 铜铝类水滑石的制备及吸附性能研究[D]. 济南: 曲阜师范大学, 2009.
- [4] 沈王庆, 兰子平, 黄秀丽. 活化煤系高岭土吸附城市污水中有机物的研究[J]. 煤炭转化, 2011, 34(3): 88-91.
- [5] 晁锦旭, 肖贤明, 陈忠正. 改性膨润土吸附剂的制备及应用研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(15): 91-94.
- [6] 孙玉焕, 赵娇娇, 李青, 等. 有机改性硅藻土去除水中亚甲基蓝和孔雀石绿染料的试验研究[J]. 非金属材料, 2011, 34(4): 66-68.
- [7] MESHKO V, MARKOVASKA L, MINCHEVA M, et al. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite[J]. Water research, 2001, 35(1): 3357-3366.
- [8] 郝艳玲, 范福海. 改性坡缕石黏土对直接大红的吸附性能研究[J]. 非金属材料, 2012, 35(4): 68-70.
- [9] 彭波, 王黎, 李艳荣. 活性氧化铝吸附法处理草甘膦生产废水的研究[J]. 化学工业与工程技术, 2007, 28(1): 44-48.
- [10] 吴俊峰, 胡红伟, 王现丽. 改性煤矸石吸附预处理洗浴废水试验研究[J]. 节水灌溉, 2010(6): 34-35.
- [11] 郭丽, 王纯莉. 活化煤处理印染废水初探[J]. 环境工程, 1993(4): 7-8.
- [12] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash [J]. Progress in energy and combustion science, 2010, 36(3): 327-363.
- [13] GUPTA V K, SUHAS T, ALI I, et al. Removal of rhodamine B, fast green, and methylene blue from wastewater using red mud, an aluminum industry waste[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2004, 43(7): 1740-1747.
- [14] 张棋, 肖华, 黄斌, 等. 农林废弃物在水处理中的应用[J]. 浙江农业科学, 2009(4): 802-805.

- [15] SAHA T K, BHOUMIK N C, KARMAKER S, et al. Adsorption characteristics of reactive black 5 from aqueous solution onto chitosan[J]. Clean - Soil Air Water, 2011, 39(10): 984-993.
- [16] 方平, 岑超平, 唐志雄, 等. 污泥含炭吸附剂对甲苯的吸附性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(5): 887-892.
- [17] 朱文发, 郭雷. 活性炭对原水中有机污染物去除效果的研究[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2012(2): 5-8.
- [18] LU C, CHUNG Y L, CHANG K F. Adsorption of trihalo-methanes from water with carbon nanotubes [J]. Water research, 2005, 39(6): 1183-1189.
- [19] XIN Z, WAN Y, FENG C, et al. Highly efficient adsorption of bulky dye molecules in wastewater on ordered mesoporous carbons[J]. Chemistry of materials, 2009, 21(4): 706-716.
- [20] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 等. 生物碳质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J]. 中国科学: 化学, 2008(6): 530-537.
- [21] LIU T, LI Y, DU Q, et al. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by graphene[J]. Colloids & surfaces B biointerfaces, 2012, 90(1): 197-203.
- [22] 陆小青, 柴晓利. 大孔树脂对渗滤液中可溶性有机物的吸附性能[J]. 净水技术, 2012, 31(3): 59-63.
- [23] 冯辉霞, 张娟, 陈娜丽, 等. 壳聚糖基复合材料在水处理中的应用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2012, 29(4): 1-4.
- [24] 霍金仙. 硅胶为载体的类脂复合吸附剂制备及对有机物的吸附特性[D]. 中国科学院生态环境研究中心, 2005.
- [25] 毛宁. 聚合物基复合材料的制备及其水处理性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [26] WU J, ZHAO H, CHEN R, et al. Adsorptive removal of trace sulfonamide antibiotics by water-dispersible magnetic reduced graphene oxide-ferrihydrite hybrids from wastewater[J]. Journal of chromatography B analytical technologies in the biomedical & life sciences, 2016, 106-112, 1029-1030.
- [27] 郑敏, 金晓英, 王清萍, 等. 改性高岭土处理含油废水的实验研究[J]. 非金属材料, 2009, 32(5): 59-61.
- [28] KHRAISHEH M A, AL-GHOUTI M A, ALLEN S J, et al. Effect of OH and silanol groups in the removal of dyes from aqueous solution using diatomite [J]. Water research, 2005, 39(5): 922-932.
- [29] SHAWABKEH R A, TUTUNJI M F. Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay[J]. Applied Claysci, 2003, 24(3): 111-120.
- [30] ALGHOUTI M A, KHRAISHEH M A, ALLEN S J, et al. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth[J]. Journal of environmental management, 2003, 69(3): 229-238.
- [31] 何少华, 黄仕元, 金必慧. 沸石在水和废水处理中的应用[J]. 矿业工程, 2004, 2(1): 24-27.
- [32] 陈辅强. 有机物影响天然沸石吸附氨氮的实验研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 91-96.
- [33] 杨浠羽, 杨吉丽, 王黎瑾. 改性沸石净化废水中有机物的研究[J]. 广州化工, 2011, 39(15): 84-85.
- [34] KULEYIN A. Removal of phenol and 4-chlorophenol by surfactant-modified natural zeolite[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 144(1/2): 307-315.
- [35] 苏银银. 阳离子改性剂负载沸石对阴离子染料和小分子有机物的吸附研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [36] CHAO H P, PENG C L, LEE C K, et al. A study on sorption of organic compounds with different water solubilities on octadecyltrichlorosilane-modified NaY zeolite [J]. Journal of the taiwan institute of chemical engineers, 2012, 43(2): 195-200.
- [37] 郑自立, 鞠党辰, 罗淑湘, 等. 坡缕石中微孔特征及其吸附机理讨论[J]. 矿产综合利用, 1996(6): 9-12.
- [38] 赵亚娟, 刘转年, 赵西成. 粉煤灰吸附剂的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(11): 88-90.
- [39] 朱新锋, 杨珊姣, 焦桂枝. 赤泥在水处理中的应用与研究进展[J]. 无机盐工业, 2010, 42(2): 5-8.
- [40] NAMASIVAYAM C, YAMUNA R T, ARASI D J S E. Removal of procion orange from wastewater by adsorption on waste red mud[J]. Environmental geology, 2001, 41(3): 269-273.
- [41] WANG S, BOYJOO Y, CHOU EIB A, et al. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud[J]. Water research, 2005, 39(1): 129-138.
- [42] 谢志刚, 刘成伦. 柑桔皮的综合利用新进展[J]. 食品与机械, 2005, 21

(5):77-80.

[43] 杨丹,陈庆国,刘梅,等. 稻草秸秆在环境污染治理中的应用研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(32):11467-11469.

[44] GONG R, JIN Y B, CHEN J, et al. Removal of basic dyes from aqueous solution by sorption on phosphoric acid modified rice straw [J]. Dyes and pigments, 2007, 73(3):332-337.

[45] 谢杰,陈天虎,庆承松,等. 稻壳发电残余物稻壳灰对有机物的吸附作用[J]. 农业工程学报,2010,26(5):283-287.

[46] SIVARAJ R, NAMASIVAYAM C, KADIRVELU K. Orange peel as an adsorbent in the removal of Acid violet 17 (acid dye) from aqueous solutions [J]. Waste management, 2001, 21(1):105-110.

[47] BRATSKAYA S, SCHWARZ S, CHERVONETSKY D. Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate[J]. Water research, 2004, 38(38):2955-2961.

[48] 李海丰,王光辉,于荣. 壳聚糖在水环境处理中的应用[D]. 科技广场, 2008(1):182-184.

[49] 李鑫,蒋白懿,孙志民,等. 活性污泥对垃圾渗滤液吸附等温线的研究[J]. 辽宁化工,2010,39(2):157-163.

[50] LILLO-RÓDENAS M A, ROS A, FUENTE E, et al. Further insights into the activation process of sewage sludge-based precursors by alkaline hydroxides [J]. Chemical engineering journal, 2008, 142(2):168-174.

[51] 陆朝阳,李爱民. 活性炭对芳香有机物的吸附作用力研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2011, 27(5):474-480.

[52] 刘通,孙贤波,刘勇弟. 活性炭吸附对生化出水中不同种类有机物的去除效果[J]. 环境化学, 2009, 28(3):369-372.

[53] 邱峰,吕秀荣,张洪林,等. 在磁场中活性炭吸附有机物的研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4):558-560.

[54] 王丁明,曹国凭,贾云飞,等. 活性炭吸附技术在水处理中的应用[J]. 环境与发展, 2011(11):190-191.

[55] 吴光前,孙新元,张齐生. 活性炭表面氧化改性技术及其对吸附性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6):955-961.

[56] 李子龙,马双枫,王栋,等. 活性炭吸附水中金属离子和有机物吸附模式和机理的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(10):88-92.

[57] HAGHSERESHT F, NOURI S, LU G Q M. Effects of carbon surface chemistry and solution pH on the adsorption of binary aromatic solutes [J]. Carbon, 2003, 41(5):881-892.

[58] 贾秀红. 碳纳米管吸附性能的研究进展[J]. 炭素技术, 2004, 23(3):25-30.

[59] GOTOVAC S, SONG L, KANOH H F, et al. Assembly structure control of single wall carbon nanotubes with liquid phase naphthalene adsorption [J]. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 2007, 300(1):117-121.

[60] 吴胜举,李凤亭,张冰如. 介孔吸附剂在水处理中的应用研究进展[J]. 工业水处理, 2010, 30(4):1-4.

[61] 崔祥婷,闻振涛,万颖. 有序介孔碳用于吸附水相中的氯代芳香族化合物[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2010, 39(3):279-283.

[62] 朱瑶瑶,凌晓凤,苗小郁,等. 载铁有序介孔碳材料的合成及对对氯酚的吸附性能[J]. 功能材料, 2013, 44(12):1694-1698.

[63] MASIELLO C A, DRUFFEL E R M. Black carbon in deep-sea sediments [J]. Science, 1998, 280(5371):1911-1913.

[64] 李耀,刘利,胡金山,等. 基于石墨烯吸附净化材料的研究进展[J]. 功能材料, 2015(21):11-16.

[65] 姚日鹏,陈凤慧,高超. 大孔吸附树脂在废水处理中的应用[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19(1):63-66.

[66] 朱桂琴,赵娜,郭芬芬. H-103 大孔吸附树脂处理废水中苯甲酸的研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(4):63-65.

[67] 庞建峰,李建. 萃取-H103 大孔树脂吸附联合处理苯胺废水研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(12):74-76.

[68] 张海珍,陆光华,黎振球. 大孔树脂对苯酚的吸附研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(1):67-70.

[69] OLIVERA S, VENKATESH V K, GUNA V K, et al. Potential applications of cellulose and chitosan nanoparticles/composites in wastewater treatment: A review [J]. Carbohydrate polymers, 2016, 153:600-618.

(上接第 19 页)

[17] 崔国文. 低温胁迫对紫花苜蓿种子萌发期可溶性糖和淀粉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(1):72-76.

[18] LIU B Y, LEI C Y, SHU T, et al. Effects of low-temperature stress on secondary metabolism in mosses exposed to simulated N deposition[J]. Plant ecology & diversity, 2015, 8(3):1-12.

[19] DU X H, HONG M, DUAN G S, et al. Preparation of sound ribbons with submicrometer-grained microstructure on a Mg-Zn alloy[J]. Science bulletin, 2015, 60(5):570-573.

[20] 姚远,闵义,胡新文,等. 低温胁迫对木薯幼苗叶片转化酶及可溶性糖含量的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(4):556-560.

[21] JUDYCKI J, JASKULA P, DOLZYCKI B, et al. Investigation of low-temperature cracking in newly constructed high-modulus asphalt concrete base course of a motorway pavement[J]. Road materials and pavement design, 2015, 16(S1):362-388.

[22] 邵台岩,许建新,薛立,等. 低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14):4237-4247.

[23] 张宇. 扁扁豆抗寒相关基因的克隆与表达分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.

[24] 郁万文,曹福亮,汪贵斌. 低温胁迫下银杏活性氧代谢与膜伤害的关系[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7):46-48.

[25] 相昆,徐颖,王新亮,等. 低温胁迫对核桃枝条活性氧代谢的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(1):35-37.

[26] 张静,李园园,黄盈盈,等. 低温胁迫下活性氧代谢与烟草花芽分化的研究[J]. 作物杂志, 2015(4):74-80.

[27] 吕秀华,乔辰,张三润,等. 低温胁迫对钝顶螺旋藻细胞过氧化和质膜透性的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(1):52-57.

[28] 蒋安,郭彦军,范彦,等. 低温胁迫对墨西哥玉米幼苗抗寒性的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(3):89-92.

[29] MURAMATSU M, HARADA Y, SUZUKI T, et al. Relationship between transition of fracture mode of carbon fiber-reinforced plastic and glass transition temperature of its resin[J]. Advanced composite materials, 2016, 25(2):1-16.

[30] 张玮,黄树燕,吴继林,等. 低温胁迫对麻竹叶片和根系抗性生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3):513-519.

[31] 陈儒钢,巩振辉,透明辉. 植物抗寒基因工程研究进展[J]. 西北植物学报, 2008, 28(6):1274-1280.

[32] 刘凯,胡春华,杜发秀,等. 东莞大蕉超表达拟南芥 CBF1 基因及其抗寒性检测[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8):1653-1660.

[33] 蒋瑶. 慈竹 CBF1 基因克隆及其耐寒性研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2012.

[34] 金万梅,董静,尹淑萍,等. 冷诱导转录因子 CBF1 转化草莓及其抗寒性鉴定[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2):223-227.

[35] 杨猛,魏玲,庄文锋,等. 低温胁迫对玉米幼苗电导率和叶绿素荧光参数的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(1):90-94.

[36] 刘娜,宋柏权,杨骥,等. 低温胁迫下甜菜纸筒苗叶喷植物调节剂试验[J]. 中国农学通报, 2014, 30(34):35-40.

[37] 许英,陈建华,朱爱国,等. 低温胁迫下植物响应机理的研究进展[J]. 中国麻业科学, 2015, 37(1):40-49.

[38] KRATSCCH H A, WISE R R. The ultrastructure of chilling stress[J]. Plant cell & environment, 2000, 23(4):337-350.

[39] 崔翠,王利鹏,周清元,等. 低温胁迫下烤烟幼苗叶片光合作用和抗氧化能力基因差异表达谱[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6076-6089.

[40] 吴雪霞,陈建林,查丁石. 低温胁迫对茄子幼苗叶片叶绿素荧光特性和能量耗散的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(11):164-169.

[41] 黄杏,陈明辉,杨丽涛,等. 低温胁迫下外源 ABA 对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4):6-11.

[42] 高琼,钮世辉,李伟,等. 低温胁迫对赤霉素代谢的调控研究[J]. 北京林业大学学报, 2014(6):135-141.