

生物质吸附剂去除废水中镉的研究进展

梁美娜¹, 张涛¹, 王敦球¹, 秦艳敏¹, 曾广庆²

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022)

摘要: 对生物质吸附剂去除废水中镉的研究和应用现状进行了综合评述。概述了镉污染来源、现状和危害, 生物质吸附剂主要有农林废弃物、微生物、活性污泥类等; 分析了生物质吸附剂吸附镉的机理和影响因素(溶液 pH 值、镉离子初始浓度、吸附剂用量、吸附时间、溶液中共存离子); 已吸附重金属离子的生物质吸附剂, 可以通过酸性溶液解吸再生。生物质吸附法作为一种重要、廉价、快速的镉污染废水的处理方法, 对镉的回收技术和工业实际应用还有待进一步研究和提高。

关键词: 吸附; 生物质吸附剂; 废水; 镉

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

2015 年“两会”上李克强总理指出:“环境污染是民生之患、民心之痛, 要铁腕治理。实施水污染防治行动计划, 加强江河湖海水污染、水污染源和农业面源污染治理, 实行从水源地到水龙头全过程监管。”其中, 废水中的重金属污染具有隐蔽性、长期性、不可降解及后果严重等特点, 并可通过食物链严重危害人类的健康和生命^[1]。因此, 治理废水中重金属具有重要的意义。

目前国内外处理废水中重金属污染方法主要分为两类: 第一类是将废水中的重金属转变成不溶化合物沉淀去除, 包括中和沉淀法、硫化物沉淀法和铁氧体共沉淀法等; 第二类是在不改变废水中重金属形态的情况下进行浓缩分离, 包括吸附法、溶剂萃取法、离子交换法和膜分离法等^[2-4]。但化学法和膜分离法处理成本较高, 沉淀法会产生大量污泥需再处理, 而生物质吸附法具有原料来源广泛、价格低廉、吸附速率快和处理效果好等优点, 目前已成为治理重金属污染的一个研究热点。

1 镉污染概述

镉是地壳中广泛存在的化学元素之一, 主要用作镍镉电池、颜料和涂料的原料。在有色金属

矿藏开采和冶炼过程中产生的含镉废渣、废水和废气是镉污染的主要来源^[5]。同时, 镉广泛应用在镍镉电池生产以及钢、铁、铜和黄铜等金属的电镀过程, 这也成为含镉废水的重要来源^[6]。水体中的镉可与无机、有机配位体结合生成多种可溶性配合物, 但天然水体中镉的溶解度受碳酸根或羟基浓度制约, 主要以镉离子(Cd^{2+})的形式存在^[7]。

近年来, 随着我国工业的发展和人口数量的增加, 在经济繁荣和生活品质提高的同时, 伴随出现的重金属污染问题越来越严重。据调查, 黄浦江干流表层沉积物中镉浓度超过背景值 2 倍; 大连湾 60% 海域监测站沉积物的镉含量超标; 锦州湾表层沉积物中锌、砷、镉和铅等重金属元素已经达到了极重的污染水平, 并使得锦州湾海域部分区域长期处于高生态风险等级^[8]。据 2004 年 1 月—2013 年 12 月的调查统计显示, 我国共发生镉污染事件 19 起^[9], 表 1 是我国近年来发生的几起重大镉污染事件。

镉的毒性极强, 且无法通过水体自净作用去除。镉在人体内的生物半衰期长达 10~30 年, 蓄积时间长达 50 年之久, 是目前已知的最易在体内

收稿日期: 2015-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21367010; 41161075); 广西“八桂学者”建设工程专项经费项目

作者简介: 梁美娜(1974—), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 水污染控制, liangmeinaa@163.com。

引文格式: 梁美娜, 张涛, 王敦球, 等. 生物质吸附剂去除废水中镉的研究进展[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(4): 676-681.

表1 近年来我国发生的重大镉污染事件
Table 1 Important cadmium pollution events in China in recent years

时间	污染事件名称
2012年1月	广西龙江河镉污染事件
2009年8月	湖南浏阳市镉污染事件
2006年1月	湘江湖南株洲段镉污染事件
2005年12月	广东北江韶关段镉严重超标事件
2004年6月	云南龙川江楚雄段镉污染事件

蓄积的毒物，被美国毒物委员会(ATSDR)列为第6位危害人体健康的有毒物质^[10-11]。镉在自然环境中可通过食物链的传递、富集和放大效应最终经由皮肤、呼吸道或消化道转移到人体各器官。镉首先通过血液被运送到肝脏，与特定蛋白质结合后形成复合物，最终被运送到肾脏，在肾脏积累就会损害肾脏过滤机制而引起尿液中钙及磷的增加，从而妨碍人体对钙的吸收，还可能引起氨基酸尿、糖尿、蛋白尿，以及腹泻、恶心、肌肉痉挛、骨髓损伤和肾结石，同时具有致癌作用^[12-13]。

2 生物质吸附剂的来源

吸附的相关技术和理论基本都是围绕着吸附剂展开，早期吸附剂的原料主要是炭，20世纪前半叶主要以活性炭和硅胶作为吸附剂^[14]。随着科学技术的发展，生物质吸附剂的发展比较迅速。目前主要研究使用的生物质吸附剂可以归纳为以下几类。

2.1 农林废弃物

农林废弃物是农、林业生产加工过程中产生

的副产品，具有价格低廉、来源广泛、可生物降解等优点，在使用过程中又能够达到以废治废的目的，因此在环境污染治理方面一直都是各国科研工作者研究的热点，尤其是在重金属吸附剂方面有很大的发展前景。尽管农林废弃物具有一定的重金属吸附能力，但活性组分含量少、吸附性能较差，可以通过对农林废弃物进行改性提高其吸附能力^[15]。近年来，我国也逐渐地开发利用农业废弃物作为处理废水中重金属污染的吸附剂，如以农作物秸秆、花生壳、白果壳、甘蔗渣、茶叶渣、橘子皮等作为吸附剂，有关去除镉的吸附研究文献见表2。

2.2 微生物

微生物吸附剂通常指的是具有吸附作用的非活性微生物，而非活性微生物具有去除重金属的作用，其吸附能力与微生物细胞壁的结构、成分密切相关^[25]。同时，微生物的细胞外表面带有负电荷，可静电吸附带正电荷的重金属离子^[26]。微生物吸附剂主要有藻类、真菌、细菌等，其中研究较多的是藻类吸附剂，相关研究文献资料见表3。

2.3 活性污泥

近年来，活性污泥作为一种生物质吸附剂，其对水中重金属的吸附能力得到了较深入的研究。活性污泥对重金属吸附性能的研究主要分为两大部分：一是以活性污泥为原料，提取其胞外聚合物，考察胞外聚合物对水中重金属离子的吸附能力；二是直接以浓缩、干燥等简单处理后的活性污泥为吸附剂，考察其对水中重金属离子的吸附

表2 农林废弃物对镉的吸附作用
Table 2 Adsorption of cadmium by agricultural and forestry wastes

名称	改性剂	吸附条件				吸附量/ (mg·g ⁻¹)	文献来源
		pH 值	初始浓度/ (mg·L ⁻¹)	吸附剂用量/ (g·L ⁻¹)	吸附时间/min		
小麦秸秆	氯化锌	6.0	100	4	120	22.30	[16]
玉米秸秆	巯基	7.0	50	2.5	1 440	116.71	[17]
水稻秸秆	未改性	6.0	25	10	60	13.90	[18]
大豆秸秆	甲醛	6.0	90	5	180	2.00	[19]
花生壳	乙二胺	4.0	25	8	60	14.17	[20]
白果壳	高锰酸钾	5.5	300	4	60	119.76	[21]
甘蔗渣	苯四甲酸二酐	4.0	100	20	280	121.00	[22]
茶叶渣	未改性	7.0	50	100	80	4.71	[23]
橘子皮	氯化镁	5.5	50	5	90	9.37	[24]

表 3 用于吸附镉的藻类
Table 3 Algae used to adsorb cadmium

微生物名称	pH 值	吸附量/(mg·g ⁻¹)	文献来源
莱茵衣藻属	6.0	42.60	[27]
小球藻属	4.0	86.60	[28]
墨角藻属	4.0	39.50	[29]
马尾藻属	5.5	18.66	[30]

能力^[31]。胞外聚合物是细菌细胞外大分子聚合物的统称，其主要来源于细菌细胞的分泌物以及细胞的自溶。根据胞外聚合物与细胞结合紧密程度的差异，结合态胞外聚合物又可以分为松散结合型胞外聚合物与紧密结合型胞外聚合物两类^[32-34]。污水处理厂的活性污泥对废水中的重金属均有一定的吸附作用，干化处理后的活性污泥对 Cd²⁺ 有较强的吸附能力^[35]。Sun 等^[36] 研究多种干化活性污泥对水中 Cd²⁺ 的吸附特性，发现其对 Cd²⁺ 的吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型，最大饱和吸附容量为 0.38 mmol·g⁻¹。何慧军等^[37] 以城市污水处理厂的剩余污泥为原料，用 6.0 mol·L⁻¹ 的硝酸进行改性，大幅度提高了污泥对 Cd²⁺ 的吸附性能，吸附量达到了 23.35 mg·g⁻¹。

3 生物质吸附剂吸附镉的机理

吸附机理因生物质吸附剂的不同而异，非活性的生物质主要靠表面吸附，而活性生物质既有表面吸附又有主动吸附。其主要机理为：物理吸附、离子交换、表面络合、酶促作用、氧化还原和无机微沉淀等^[38]。这些机理可能单独作用，也可能同时作用，取决于吸附过程的条件和环境。

物理吸附是吸附剂与重金属之间通过静电作用产生的相互吸引力。这种吸引力比化学键弱，比化学键键能要小 1~2 个数量级。与重金属接触时，由于吸附剂较大的比表面积，先进行的是物理吸附，但结合力较弱，吸附速度也较快，被吸附的重金属也容易解析出来，在一定程度上物理吸附是可逆的。

离子交换机理一般被认为是重金属离子附着在细胞表面的机制，适宜条件下金属首先被吸附作为核心位点进一步在细胞表面沉积和扩大。在细胞吸附重金属离子的同时，伴随有其他阳离子的释放。成先雄等^[39] 对啤酒酵母吸附镉离子的机理进行研究发现，啤酒酵母对 Cd²⁺ 离子的吸附主要发生在细胞壁，酵母对 Cd²⁺ 离子的吸附可能与

离子交换有关。

表面络合机理：当生物质与含 Cd²⁺ 的废水混合，Cd²⁺ 首先与生物质细胞表面接触，生物质细胞表面主要由多聚糖、蛋白质和脂类组成，这些组成中可与 Cd²⁺ 相结合的主要官能团有羟基、羧基、羰基、胺基、酰胺基和磷酸基等，其中氮、氧、磷和硫作为配位原子与 Cd²⁺ 配位络合^[40]。徐楠楠等^[41] 对玉米秸秆生物炭吸附 Cd²⁺ 的前后生物炭样品进行了表征分析，结果表明，生物炭对 Cd²⁺ 的吸附机理主要为表面羟基和羰基与 Cd²⁺ 发生络合化学反应。代淑娟等^[42] 研究水洗废啤酒酵母对电镀废水中 Cd²⁺ 的吸附规律，采用红外光谱分析发现，羟基、胺基和酰胺基等的峰形、峰位发生变化，其中的硫、氧、氮等原子可提供孤对电子与 Cd²⁺ 发生络合。

酶促机理：非活性和活性的生物质都能吸附重金属，活性生物质对重金属的吸附与细胞上某种酶的活性有关。如啤酒酵母中的磷酸酶能够将溶液中的重金属离子运进细胞内，这种磷酸酶是通过在细胞培养过程中引入一种“磷酸供体”而产生的^[43]。

氧化还原和无机微沉淀机理：变价金属离子在具有还原能力的生物质上吸附，有可能发生氧化还原反应，也有可能在细胞壁上或细胞内形成无机物沉淀。酸还原菌（SRB）在厌氧条件下产生的 H₂S 能和 Cd²⁺ 反应生成硫化镉沉淀而除去废水中的 Cd²⁺^[44]。

4 生物质吸附剂吸附镉的影响因素

4.1 溶液 pH 值

溶液 pH 值对吸附剂上官能团的解离及对吸附剂的有效性和特异性都有很大影响。只有在合适的 pH 范围内，才能够有效地吸附 Cd²⁺。pH 值低时，大量的 H⁺ 会和 Cd²⁺ 竞争，并且使得官能团质子化，吸附位点减少，与 Cd²⁺ 的结合力减弱；当 pH 值过高时，Cd²⁺ 就会以氢氧化物的形式存在，不利于吸附反应的进行，从而影响 Cd²⁺ 的去除效果^[45]。丁洋等^[46] 研究不同溶液 pH 值对板栗内皮吸附水中 Cd²⁺ 的影响，发现当溶液 pH 值介于 1~3 时，板栗内皮对 Cd²⁺ 吸附量随着 pH 值的增大而迅速增加；当 pH 值介于 3~6 时，吸附量变幅很小，吸附达到最大容量，最大吸附容量约

为 $14.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。文献 [47] 利用化学方法改性后的干草来吸附 Cd^{2+} ，结果表明：当溶液的 pH 值小于 2 时，吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附量很小，而随着溶液 pH 值的增大，吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附量也随之增加，当 pH 值在 5.5 ~ 6.0 时吸附量最大；继续增大溶液的 pH 值，则由于溶液中 OH^- 的增加，吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附量下降。

4.2 镉离子初始浓度

在吸附开始阶段吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附量会随着 Cd^{2+} 初始浓度的增大而增大，当达到吸附平衡时吸附量就不再增大。龙腾等^[48]研究了改性花生壳对不同初始浓度 Cd^{2+} 的穿透曲线的影响，当初始浓度为 0.55、2.00、11.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸附柱穿透时间分别为 49.09、12.40、5.38 h，初始浓度增加，吸附剂单位时间吸附的镉离子量增加，因而吸附柱达到穿透点的速度更快。

4.3 吸附剂用量

吸附剂用量对于吸附体系有很大的影响，当溶液中重金属离子的浓度和体积一定时，重金属的去除率会随着吸附剂用量的增加而增大，因为增加吸附剂的用量也就增加了溶液中的吸附位点。李旭东等^[49]研究草木灰投加量对 Cd^{2+} 吸附的影响时发现，随着投加量从 0.1 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 1.8 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，草木灰对 Cd^{2+} 的去除率逐渐上升，直到草木灰投加量到 0.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时去除率达到 99% 后趋于平稳。

4.4 吸附时间

吸附时间能够在很大程度上影响重金属的吸附，在达到吸附平衡之前，吸附量会随着时间的延长而增大，而后慢慢达到吸附平衡。多数研究认为^[50-52]，吸附过程可分为 2 个阶段：第 1 阶段为快速表面吸附过程，此时吸附速率很高，吸附量快速增大；第 2 阶段为慢速阶段，逐渐达到平衡，是一个慢速的内扩散过程。程启明等^[53]用花生壳生物质炭对 Cd^{2+} 进行吸附，在开始吸附 10 min 后其吸附量为 $13.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，达到最大吸附量的 63.96%，到 48 h 时吸附量达到最大值 $21.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

4.5 溶液中共存离子

当溶液中存在其他金属离子时，会与目标离子竞争吸附剂表面的吸附位点，从而导致目标离子的吸附量减少，影响去除效果。林芳芳等^[54]用

高锰酸钾改性的花生壳吸附含有 Cd^{2+} 和 Pd^{2+} 的双组分溶液，随着共存 Pd^{2+} 浓度的升高，改性花生壳对 Cd^{2+} 吸附量变化不大，但与无 Pd^{2+} 共存时相比， Cd^{2+} 吸附量降低了很多，可见低浓度的 Pd^{2+} 即能够干扰 Cd^{2+} 的吸附，推测改性花生壳对 Cd^{2+} 的吸附以离子交换吸附为主。

5 生物质吸附剂的再生

对吸附剂再生的研究，能有效防止废弃吸附剂对环境造成二次污染^[55]。实验中常用盐酸、硫酸、硝酸等解吸被生物质吸附剂吸附的重金属离子，其方法是已将吸附重金属离子的吸附剂置于酸性溶液中，通过 H^+ 对重金属离子的竞争吸附作用，将重金属离子置换出来达到再生目的。Gupta 等^[56]用 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸对吸附 Cd^{2+} 的海藻 *Oedogonium* sp. 进行解吸研究，5 次循环中海藻的吸附容量分别为 42.8、40.1、38.8、36.5、34.2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。陈荣平等^[57]用 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸溶液作为解吸剂，解吸后的腐殖酸吸附剂再用 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液活化，然后用超纯水洗涤吸附剂，处理后的腐殖酸吸附剂进行下一轮的吸附实验，如此重复 5 个循环， Cd^{2+} 的吸附量分别为 20.12、19.35、18.96、18.52、18.13 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由此可见，生物质吸附剂可多次循环使用，具有很好的实际应用价值。

6 总结与展望

目前随着国内外镉污染的日益严重，生物质吸附法作为一种重要的镉污染废水的处理方法，具有原料来源广泛、价格低廉、吸附速率快和处理效果好等优点，在国内外已被广泛研究。许多新型生物质吸附剂已被发现和研究，其对镉的吸附机理在不断的研究中逐渐明了。但依然还存在一些问题：如镉作为一种宝贵的资源，在诸多加工制造行业具有极高的利用价值，所以今后应当加强镉回收技术的研究；同时要做好将先进、高效的生物质吸附技术从实验室的研发阶段投入到工业实际操作的推广应用工作。

参考文献：

- [1] 蒋艳艳, 胡孝明, 金卫斌. 生物炭对废水中重金属吸附研究进展 [J]. 湖北农业科学, 2013, 52 (13): 2984 - 2988.

- [2] Atar N, Olgun A, Wang S B. Adsorption of cadmium (II) and zinc (II) on boron enrichment process waste in aqueous solutions: batch and fixed-bed system studies [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 192(2): 1-7.
- [3] Luo C, Wei R Y, Guo D, et al. Adsorption behavior of MnO_2 functionalized multi-walled carbon nanotubes for the removal of cadmium from aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 225 (6): 406-415.
- [4] 陈坦, 韩融, 王洪涛, 等. 污泥基生物炭对重金属的吸附作用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54 (8): 1062-1067.
- [5] 于晓莉, 刘强. 水体重金属污染及其对人体健康影响的研究 [J]. 绿色科技, 2011 (10): 123-126.
- [6] 代淑娟, 魏德洲, 白丽梅, 等. 生物吸附-沉降法去除电镀废水中镉 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18 (10): 1945-1950.
- [7] 冯源. 重金属铅离子和镉离子在水环境中的行为研究 [J]. 北方环境, 2013, 29 (3): 87-93.
- [8] 张玉凤, 王立军, 霍传林, 等. 锦州湾表层沉积物重金属污染状况评价 [J]. 海洋环境科学, 2008 (2): 178-181.
- [9] 谈珊. 断裂与弥合: 环境与健康风险中的标准建设——基于环境铅、镉污染造成人群健康危害的社会调查 [J]. 法制与经济, 2014 (2): 104-105.
- [10] 李学鹏, 段青源, 励建荣. 我国贝类产品中重金属镉的危害及污染分析 [J]. 食品科学, 2010, 31 (17): 457-461.
- [11] 李静慧, 徐兆发. 镉致肾细胞凋亡机制的研究进展及防治 [J]. 毒理学杂志, 2014, 28 (4): 319-322.
- [12] Waseem M, Mustafa S, Naeem A, et al. Cd^{2+} sorption characteristics of iron coated silica [J]. Desalination, 2011, 277 (1-3): 221-226.
- [13] Lee S M, Laldawngliana C, Tiwari D. Iron oxide nano-particles-immobilized-sand material in the treatment of Cu (II), Cd (II) and Pb (II) contaminated waste waters [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 195-196(7): 103-111.
- [14] 郑刘春, 党志, 曹威, 等. 基于改性农业废弃物的矿山废水中重金属吸附去除技术及应用 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2015, 47 (1): 1-12.
- [15] 刘文霞, 李佳昕, 王俊丽, 等. 改性泡桐树叶吸附剂对水中铅和镉的吸附特性 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (6): 1226-1232.
- [16] 刘恒博, 徐宝月, 李明明, 等. 改性小麦秸秆对水中 Cd^{2+} 吸附的研究 [J]. 水处理技术, 2013, 39 (4): 15-19.
- [17] 高宝云, 邱涛, 李荣华, 等. 巯基改性玉米秸秆粉对水体重金属离子的吸附性能初探 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (3): 185-190.
- [18] Ding Y, Jing D B, Gong H L, et al. Biosorption of aquatic cadmium (II) by unmodified rice straw [J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 20-25.
- [19] Han R P, Zhang L J, Song C, et al. Characterization of modified wheat straw, kinetic and equilibrium study about copper ion and methylene blue adsorption in batch mode [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79: 1140-1149.
- [20] Liu Y, Sun X M, Li B H. Adsorption of Hg^{2+} and Cd^{2+} by ethylenediamine modified peanut shells [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81 (2): 335-339.
- [21] 苏鹏, 伍钧, 杨刚, 等. 改性白果壳对水溶液中重金属镉的吸附研究 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (6): 1218-1225.
- [22] 池汝安, 王丽艳, 余军霞, 等. 改性甘蔗渣对镉离子的吸附 [J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35 (12): 12-16.
- [23] 张军科, 郝庆菊, 江长胜, 等. 废弃茶叶渣对废水中铅 (II) 和镉 (II) 的吸附研究 [J]. 中国农学通报, 2009, 25 (4): 256-259.
- [24] 郭学益, 梁莎, 肖彩梅, 等. MgCl_2 改性橘子皮对水溶液中镉镍的吸附性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42 (7): 1841-1846.
- [25] Kinoshita H, Sohma Y, Ohtake F, et al. Biosorption of heavy metals by lactic acid bacteria and identification of mercury binding protein [J]. Research in Microbiology, 2013, 164 (7): 701-709.
- [26] 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 等. 菌根真菌重金属耐性机制研究进展 [J]. 环境科学, 2015, 36 (3): 1123-1132.
- [27] Tüzün i, Bayramoglu G, Yalçın E, et al. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg (II), Cd (II) and Pb (II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 77 (2): 85-92.
- [28] Aksu Z, Dönmez G. Binary biosorption of cadmium (II) and nickel (II) onto dried *Chlorella vulgaris*: Co-ion effect on mono-component isotherm parameters [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(4): 860-868.
- [29] Freitas O M M, Martins R J E, Delerue-Matos C M, et al. Removal of Cd (II), Zn (II) and Pb (II) from aqueous solutions by brown marine macro algae: kinetic modelling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153 (1-2): 493-501.
- [30] Montazer-Rahmati M M, Rabbani P, Abdolali A, et al. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of cadmium, lead, and nickel ions from aqueous solutions by intact and chemically modified brown algae [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185 (1): 401-407.
- [31] 包汉峰, 杨维薇, 张立秋, 等. 污泥基活性炭去除水中重金属离子效能与动力学研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (1): 69-74.
- [32] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. Water Research, 2007, 41 (5): 1022-1030.
- [33] Celik G Y, Aslim B, Beyatli Y, et al. Characterization and production of the exopolysaccharide (EPS) from *Pseudomonas aeruginosa* G1 and *Pseudomonas putida* G12 strains [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73 (1): 178-182.
- [34] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 [J]. 环境科学, 2013, 34 (7): 2752-2757.
- [35] Wang X J, Xu X M, Liang X, et al. Adsorption of copper (II) onto sewage sludge-derived materials via microwave irradiation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192 (3): 1226-1233.
- [36] Choi S B, Yun Y-S. Biosorption of cadmium by various types

- of dried sludge: an equilibrium study and investigation of mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, B138 (2): 378–383.
- [37] 何慧军, 杨春平, 罗胜联, 等. 改性污泥活性炭对水中镉离子的吸附性能 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6 (11): 4034–4040.
- [38] Qaiser S, Saleemi A R, Ahmad M M. Heavy metal uptake by agro based waste materials [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2007, 10 (3): 409–416.
- [39] 成先雄, 周丹, 邱延省. 啤酒酵母对镉离子的吸附特性及机理研究 [J]. *湖南有色金属*, 2007, 23(2): 51–54.
- [40] Krishnani K K, Meng X G, Christodoulatos C, et al. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomass from rice husk [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153 (3): 1222–1234.
- [41] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 玉米秸秆生物炭对 Cd^{2+} 的吸附特性及影响因素 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (5): 958–964.
- [42] 代淑娟, 魏德洲, 白丽梅, 等. 水洗废啤酒酵母去除电镀废水中镉的工艺试验研究 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2010, 31 (1): 127–131.
- [43] 李成鹏, 张超, 刘玉倩, 等. 酵母细胞对溶液中 Co^{2+} 和 Cd^{2+} 的生物富集 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9 (3): 1501–1506.
- [44] 肖利萍, 张镭, 李月. 硫酸盐还原菌及其在废水厌氧治理中的应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22 (1): 45–49.
- [45] 谭光群, 袁红雁, 刘勇, 等. 小麦秸秆对水中 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附特性 [J]. *环境科学*, 2011, 32 (8): 2298–2304.
- [46] 丁洋, 靖德兵, 周连碧, 等. 板栗内皮对水溶液中镉的吸附研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31 (9): 1933–1941.
- [47] Chen L H, Lü L L, Shao W J, et al. Kinetics and equilibria of $\text{Cd}(\text{II})$ adsorption onto a chemically modified lawn grass with H[BTMPP] [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, 56(4): 1059–1068.
- [48] 龙腾, 易筱筠, 党志. 改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33 (9): 3177–3181.
- [49] 李旭东, 毛志成, 谢翼飞, 等. 草木灰对 Cd^{2+} 废水吸附性能和动力学特征研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44 (8): 39–42.
- [50] 王建龙, 陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30 (4): 673–701.
- [51] 李欣, 谭周亮, 周后珍, 等. 3种微生物吸附剂对低浓度 Cd^{2+} 的吸附特性研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34 (12): 7–13.
- [52] Alsilaib T M, Abustan I, Ahmad M A, et al. Cadmium removal from aqueous solution using microwaved olive stone activated carbon [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, 1 (3): 589–599.
- [53] 程启明, 黄青, 刘英杰, 等. 花生壳与花生壳生物炭对镉离子吸附性能研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (10): 2022–2029.
- [54] 林芳芳, 易筱筠, 党志, 等. 改性花生壳对水中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (7): 1404–1408.
- [55] Anirudhan T S, Sreekumari S S. Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut buttons [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23 (12): 1989–1998.
- [56] Gupta V K, Rastogi A. Equilibrium and kinetic modelling of cadmium(II) biosorption by nonliving algal biomass *Oedogonium* sp. from aqueous phase [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(1): 759–766.
- [57] 陈荣平, 张银龙, 马爱军, 等. 腐殖酸改性及其对镉的吸附特性 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2014, 38 (4): 102–106.

Research advances of cadmium removal from wastewater by biomass adsorbent

LIANG Mei-na¹, ZHANG Tao¹, WANG Dun-qiu¹, QIN Yan-min¹, ZENG Guang-qing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Academy of Environmental Protection Sciences, Nanning 530022, China)

Abstract: The current research and application status of cadmium removal from wastewater using biochar adsorbents is reviewed. The cause, present situation and harm of the cadmium contaminate are summarized. Biochar adsorbents includes agricultural and forestry wastes, microorganism and activated sludge, the mechanism and influence factors of adsorption of biochar adsorbents were analyzed (the pH value, initial cadmium concentration, adsorption time, dose of adsorbent and coexistence ion in solution). The adsorbents which have adsorbed heavy metal ions can be generated via acid solution desorption. Biochar adsorption, regarded as an important, cheap and rapid method to treat cadmium polluted water, still needs to be studied for recycling cadmium and industry application in future.

Key words: adsorption; biomass adsorbent; wastewater; cadmium