

城市垃圾渗滤液处理现状与展望

叶志成*, 张璇

马鞍山学院, 建筑工程学院, 安徽 马鞍山
Email: 1149401561@qq.com

收稿日期: 2020年12月3日; 录用日期: 2021年1月4日; 发布日期: 2021年1月12日

摘要

城市垃圾无论采取何种处置工艺都会不可避免的产生渗滤液。垃圾渗滤液是一种高浓度有机废水, 富含有毒有害物质对环境危害大, 一直面临着处理工艺复杂、达标难、处理成本大的问题。本文分析和探讨了目前我国渗滤液主流处理工艺优缺点, 提出了未来在大力推行城市垃圾分类处理, 实现渗滤液减量化的前提下最终逐步形成渗滤液的“减量化 + 无害化 + 资源化”的综合处理对策。

关键词

渗滤液, 生物处理, 物化处理, 高级氧化

Review and Prospect for Leachate Treatment

Zhicheng Ye*, Xuan Zhang

School of Civil Engineering, Ma'anshan University, Ma'anshan Anhui
Email: 1149401561@qq.com

Received: Dec. 3rd, 2020; accepted: Jan. 4th, 2021; published: Jan. 12th, 2021

Abstract

The leachate will inevitably be produced no matter what disposal technology is adopted for municipal waste. Landfill leachate is a kind of organic wastewater with high concentration. Its complex composition and rich toxic and harmful substances cause great harm to the environment. It is always faced with the problems of complex treatment technology, difficulty in reaching the standard and high treatment cost. This paper analyzes and discusses the advantages and disadvantages

*第一作者。

es of the main treatment technology of leachate in our country at present, and puts forward the comprehensive treatment countermeasures of reducing, harmless and recovering the leachate gradually in the future.

Keywords

Leachate, Biological Treatment, Physico-Chemical Treatment, Advanced Oxidation Processes

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国城市垃圾以每年 10%速度不断增加, 巨大数量的城市垃圾使我国众多城市处于“垃圾围城”的窘状, 成为困扰城市发展和社会经济增长的难题。生活垃圾常见的处理方法有焚烧、堆肥、卫生填埋等[1]。卫生填埋由于技术成熟、经济有效、运输管理方便等特点一直是城市垃圾处理的主要处理方式。尽管政府出台以一系列政策推动城市垃圾的焚烧发电厂的建设, 但是卫生填埋在如今以及以后很长的一段时间内依旧是我国城市垃圾处理的主要处置方式。但是卫生填埋也面临着一些不可避免的缺点, 例如卫生填埋会产生大量的渗滤液, 渗滤液的处理难达标, 处理费用高一直被广泛的关注。目前我国渗滤液的处理主要包括物化法、生物法和高级氧化法等, 本文通过对传统主流工艺的优缺点进行简单分析, 并对未来渗滤液的处理方向进行探讨, 以期能为渗滤液处理技术的发展起到一定的借鉴意义。

2. 城市垃圾渗滤液的特点

我国城市垃圾渗滤液的主要来源是: 1) 填埋场堆放及填埋操作过程中受重力及其它物理作用渗出; 2) 自然降水; 3) 垃圾游离水; 4) 有机物分解产生水以及入渗地下水等淋溶作用, 产生的废水[2]。

城市垃圾渗滤液是一种高浓度的有机废水, 富含众多有毒有害的物质, 主要包括溶解性有机物, 无机盐成分, 重金属以及具有“三致”作用的其它污染物。垃圾渗滤液不同于一般的城市生活废水, 它具有污染强度高持续时间长, 水质水量波动大, 氨氮含量高, 营养元素比例失调以及金属离子含量超标等特点。因此, 垃圾渗滤液会带来以下危害: 1) 污染周边水源, 包括地下水和地表水, 使得周边水源有机物及重金属严重超标; 2) 污染大气环境, 渗滤液的积存伴有恶臭影响周边人类及动植物生存; 3) 污染周边土壤, 渗滤液渗漏至土壤污染, 导致土壤污染物超标等[3]。

3. 垃圾渗滤液的处理现状及存在问题

就我国目前垃圾渗滤液的处理现状来讲, 技术水平工艺参差不齐, 缺乏处理效果好且经济成本可行的方法[4][5]。目前我国渗滤液的处理主要包括, 物化法, 生物法和高级氧化法等。垃圾渗滤液的处理面临着物化法处理成本高, 生物法单独处理难以达标排放, 难以资源化等困境。虽然生化技术与膜技术相结合可以达到相应的排放标准, 但由于投资成本高、运行难度大等难以解决的问题。故对新型垃圾渗滤液处理方法及工艺的探索和实践迫在眉睫, 寻求新型高附加值的资源化处置技术十分必要。

3.1. 物理化学处理法

渗滤液的物理化学处理法主要是用来去除垃圾渗滤液中的氨氮和无机物质, 为后续的生物处理提供

有利的条件是渗滤液预处理的主要工艺。包括混凝沉淀法, 吸附法以及氨吹脱法等。

1) 混凝沉淀法

混凝沉淀法可以有效地处理难降解废水, 相比于其它处理技术能更有效的去除渗滤液中的悬浮物和胶体杂质。化学混凝法通过添加混凝剂将水体中的微小浮颗粒与胶体物质脱稳、互相聚合、增大至自然沉淀。混凝沉淀法所涉及的因素很多其主要机理归纳起来主要是四个方面: 压缩双电层理论, 吸附电中和理论, 网捕作用, 吸附架桥理论。不同的混凝剂对渗滤液的处理效果有一定的差异, 因此应当根据不同渗滤液的特性选择不同的混凝剂。张海霞等[6]运用混凝沉淀法作为深度处理渗滤液的方法, 并比较聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铁(PFC)和聚丙烯酰胺(PAM)的处理效果, 指出 PFS 的处理效果虽不及 PAM, 但差距不大且受 pH 的影响小, 相对经济综合考虑应选择 PFS 作为混凝剂。汤红妍等[7]研究磷酸铵镁(MAP)对洛阳市填埋场渗滤液处理效果, 并对 Mg:P:N 投加比例, 沉淀时间, pH 值等影响条件设计正交实验, 指出最佳的反应条件为 pH=9.5, Mg:N=1.8:1, P:N=1.8:1, 在此条件下 NH_4^+ -N 去除率达到 97% 以上, COD 的去除率达到 20% 左右。单独混凝法处理效果毕竟有限, 有报道混凝和其它技术结合处理渗滤液效果更好。Li 等[8]将混凝剂与活性炭吸附剂联合协同预处理垃圾渗滤液, 不仅有效去除水样中的色度、浊度和 COD, 同时去除部分重金属, 降低了生物毒性。

2) 吸附法

吸附法是利用比表面积比较大固体物质将渗滤液中的污染物质吸附到固体表面。吸附剂通过分子间的范德华力, 化学键力以及离子交换等共同作用将污染物富集在吸附剂表面。常见的吸附剂主要包括活性炭, 粘土, 粉煤灰, 沸石等。寻找经济有效处理效果好的吸附剂, 或是在原有吸附剂的基础上, 进行改进提高吸附性, 一直是吸附法主要研究方向。李章良等[9]为了提高粉煤灰的吸附性能用不同微波活化一段时间得到改性粉煤灰分别处理渗滤液, 实验指出微波改粉煤灰对垃圾渗滤液中的 COD_{Cr} 和色度的去除效果明显优于未改性粉煤灰, COD_{Cr} 和色度去除率最高分别可达 46.05% 和 81.16%。刘辉等[10]将玉米芯风干粉碎后高温碳化得到活化玉米芯活性炭来处理渗滤液。这种活性炭不仅原料来源丰富而且处理效果相当好。

无论是哪种物化处理技术都面对着处理成本高, 产生二次污染的缺点。针对这些缺点改进现有技术降低能耗物化法的研究热点, 例如蒸汽压缩蒸发(MVC)是运用蒸汽被压缩时其压力和温度得到逐步提升的特性。当较高温度的蒸汽进入蒸发器的换热管里, 而冷水在管外喷淋时, 蒸汽在管里面冷凝形成冷凝水, 蒸汽的热传给管外的喷淋水进行连续的蒸发。在整个系统中能量的输入只有压缩机的马达和很小的保持系统稳定操作的浸入式加热器, 因此能耗较小。MVC/MVR 低能耗蒸发技术能直接处理垃圾渗滤液, 在降低能耗的情况下, 也能使处理的渗滤液达到 GB 16889-2008《生活垃圾填埋场污染控制标准》制定的标准。

3.2. 生物处理工艺

生物处理工艺能去除渗滤液中各种有机物, 具有处理效率高、不会出现化学污泥及处理费用较低的优点。生物处理技术成熟运用广泛, 生物处理法的具体技术工艺形式大体上包括好氧处理法、厌氧处理法及二者相结合等方法。

3.2.1. 好氧生物处理法

好氧生物处理的主要原理是微生物在富氧条件下, 微生物以渗滤液中的有机物为原料, 将有机物进行好氧分解来实现微生物自身的新陈代谢。这种方法对渗滤液中的各种污染物都有一定的去除作用, 而且反应比较迅速。好氧生物处理主要有活性污泥法、曝气氧化塘法及好氧生物膜法。

1) 序批式活性污泥法(SBR)。SBR 是一种在传统活性污泥法的基础上经过深化改革而发展出的一种

处理效果好的污水处理方法。活性污泥法具有设备简单、易于管理、污泥活性好、生化反应速率高、泥水分离效果好及污泥不易出现膨胀等特点。Spagni 等[11]采用实时控制 SBR 工艺处理渗滤液, 实验结果表明氨氮和总氮的去除率均值分别为 98%和 95%, 但出水 COD_{Cr} 去除率较低, 仅 20%~30%。目前我国都致力于研究如何使 SBR 法的处理效果更好, 出现了一些关于 SBR 与其它方法共同处理渗滤液以及生物增效的 SBR 法。孙铁刚等[12]在渗滤液处理现场进行了生物增效结合 SBR-AO 处理垃圾渗滤液的中试实验, 生物增效较未经生物增效的 SBR 处理效果有较明显的改善。

2) 膜生物反应器(MBR)是国内研究最多的垃圾渗滤液膜处理工艺, 是由膜组件和生物反应器两部分组成。汪进辉等采用一体式聚丙烯 MBR 处理垃圾渗滤液, 结果表明此系统对 COD 和氨氮的去除率较高, 出水 SS 基本为零, 但是同时膜通量下降很快, 且维持在较低的水平。欧阳科等[13]采用一体式 MBR 处理垃圾渗滤液, 系统考察 MBR 对 COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 的去除效果, 结果表明垃圾渗滤液的 COD 可降至 650~1500 mg/L, 同时在 MBR 处理垃圾渗滤液的运行中发现, 膜的污染速度较快, 并且呈现“两段性”的规律, 采用碱 + 氧化剂的清洗方式可有效去除膜污染, 降低过膜压力。

3.2.2. 厌氧生物处理法

厌氧处理法利用厌氧微生物在缺氧条件下的新陈代谢作用, 对垃圾渗滤液中的有机污染物有很好的降解功效。厌氧生物处理法与好氧技术相比有反应时间长处理建筑容积大的缺点, 但其产泥量少、操作简单、投资及运行费用低, 适合于处理可生化性差、有机物浓度高的垃圾渗滤液。近年来厌氧生物处理技术被广泛应用于垃圾渗滤液的处理领域中。上升式厌氧污泥床反应器(UASB)有较好的固液分离系统, 是应用最广泛的垃圾渗滤液的厌氧处理工艺。王伟等[14]采用改进型的外循环 UASB 反应器来处理渗滤液, 实验结果显示外循环 UASB 反应器在高负荷情况下处理浓度高的垃圾渗滤液具有较高的产气率。采用外循环 UASB 反应器, 虽然 COD 去除效果较好但依旧不能达标排放, 需要后续的工艺继续处理。

3.2.3. 厌氧 - 好氧生物组合法

厌氧处理工艺适合于高浓度有机废水, 处理周期较长, 而好氧处理水力停留时间较短, 单独用厌氧法或好氧法处理垃圾渗滤液很难达到国家排放标准。因此, 采用厌氧好氧相结合的处理工艺, 经济合理, 可以同时去除多种污染物。研究表明厌氧好氧的组合工艺处理渗滤液的效果明显好于单个处理工艺的效果。金永祥等[15]采用复合式 A/O 工艺处理处理晚期渗滤液, 结果表明, 渗滤液出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的质量浓度小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到了生活垃圾填埋场污染控制标准。为了实现 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的同时去除, 吴莉娜等[16]采用 UASB1+A/O+UASB2 的组合工艺处理, 后置 UASB 充分利用 A/O 段的污水中的碳源实现经济高效的降解。通过运用 UASB1+A/O+UASB2 的组合工艺, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率达到了 97%, TN 的去除率达到了 95%。

老龄的渗滤液其生化性差, 微生物处理往往难以奏效, 因此需要其它工艺配合处理。为了提高处理效果, 利用复合的微生物菌剂, 用生物工程的技术驯化培养得到高效的微生物。李红等[17]向渗滤液中投加 BM 复合微生物菌剂, 研究其处理效果及原理, 指出投加菌剂的实验组的处理效果要好于没有投加菌剂的实验组。新工艺的运行和研究也被广泛关注, 例如在普通活性污泥和回转式生物接触法基础上发展来的新工艺 JS-BC 工艺。通过将土壤菌(Bacillus)在 JS-BC 装置和曝气池内有效地增殖、活性化从而高效去除 BOD、COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、TP 等污染物, 并同时分解系统臭气的先进、高效的处理系统[18]。

3.3. 高级氧化法

高级氧化法(AOPs)是近些年来在水处理领域兴起的新技术[19]。高级氧化法是在电、光辐射、催化剂、氧化剂等反应条件下, 产生活性非常强的羟基自由基, 羟基自由基能将水中的难降解有机物氧化为

低度或无毒的小分子中间产物, 甚至直接氧化二氧化碳和水。按照自由基产生的方式不同, 高级氧化技术分为 Fenton 法、臭氧氧化法、电化学氧化法等。

Fenton 技术利用 Fe^{2+} 均相催化反应使 H_2O_2 催化分解成羟基自由基从而降解垃圾中的渗滤液。陈迪等 [20] 运用 Fenton 技术处理循环式准好氧垃圾渗滤液, 实验找出 Fenton 技术的最佳运行条件下 COD_{Cr} 去除率为 84.77%, 色度去除率为 60%。然而, Fenton 法的催化剂难以分离和重复利用, 反应 pH 低, 会生成大量含铁污泥, 出水中含有大量 Fe^{2+} , 容易引起二次污染, 而且处理废水时间较长, 试剂用量大, 于是就发展了改进的 Fenton 法被称为类 Fenton 法, 例如超声、光照和电 Fenton 技术。Mohajeri 等 [21] 采用电 Fenton 法处理垃圾渗滤液, COD 和色度去除率最高分别达 94.07%, 95.83%。

臭氧的氧化性极强, 氧化还原电位仅次于氟, 其可以通过本身的氧化性直接氧化渗滤液中的有机物, 臭氧也可以分解产生羟基自由基来氧化渗滤液中的有机物。臭氧对污水除臭、消毒、除色以及有机物的去除都有良好的处理效果, 并且不会带来二次污染。单独使用臭氧氧化法处理垃圾渗滤液存在 O_3 利用率低、氧化能力不足、处理费用高及降解效果差等诸多问题。因此, 为了提高 O_3 利用效率、氧化速度和氧化能力, 众多学者探索了多项催化手段与臭氧氧化技术进行结合的工艺, 该工艺促进 O_3 分解, 形成了臭氧联合处理的高级氧化法。刘卫华等 [22] 用催化臭氧氧化法处理富含难降解有机物并与单纯的臭氧法比较, 研究指出, 采用催化臭氧氧化可明显提高 TOC 和 COD 去除率。

与其它高级氧化法相比电化学氧化技术可在常温常压下进行, 电化学氧化法因其高效和易操作被认为是污水处理的最有效方法。Lei 等 [23] 将生化后的垃圾渗滤液采用电化学氧化法进行深度处理, COD、氨氮、BOD 的去除率分别达到 98.5%, 99.9%, 99.9%, 表明电化学氧化技术对渗滤液污染物的去除具有良好的效果。电化学氧化法原理是, 在阴极释放出电子发生还原反应, 大部分重金属类物质可以得到去除; 在阳极吸收电子, 发生氧化反应, 有机物可以被矿化降解, 氧化反应在溶液中也同时进行。该方法发生在水中, 不需要另加催化剂, 避免二次污染, 而被称为是“环境友好技术”, 是目前最可能被工业化利用的技术之一。

除此之外还有等离子体氧化法、超临界氧化法、光化学氧化法等氧化技术处理垃圾渗滤液, 虽然高级氧化法的处理效果好但是也都面临着能耗大, 技术不成熟等问题。考虑到经济因素可以和其它技术协同处理垃圾渗滤液, 研究能耗低的高级氧化法, 或是利用渗滤液以及填埋场本身的物质资源化来为处理技术供能可进一步发展。

4. 渗滤液处理技术发展趋势

前文叙述的无论是生物法还是化学法的处理技术中都会存在处理费用较高及工艺复杂的缺点, 而最佳的渗滤液处理方法应该是对环境影响小且经济合理的工艺。“减量化, 资源化, 无害化”一直是各国城市生活垃圾处理的一个处理的指导原则, 垃圾渗滤液的处理也可以参照这个指导原则解决未来垃圾渗滤液的处理。

4.1. 渗滤液的减量化

随着社会的进步和发展, 城市化进程的加快城市垃圾的产生量也逐步上升, 渗滤液的处理的形势也更加严峻。垃圾渗滤液的处理应当从源头控制, 减少渗滤液量的产生以及减少有害物质进入到渗滤液中, 实现渗滤液的减量化

机械生物处理(MBT)技术结合了一系列机械和生物过程, 用于对未经过任何处理的原始城市生活垃圾 [24]。为了避免城市生活垃圾中大量可生物降解的有机物未经过处理直接填埋, 通过机械的过程分选出可直接利用的物质, 然后有机质部分经过生物的好氧或厌氧的处理, 剩余部分进入填埋场填埋。机械生

物法处理后的垃圾填埋其特点是避免了大量有机物填埋产生的填埋气和渗滤液, 这样的垃圾填埋产生的渗滤液所含的有机质少, 负荷底, 可生化性较好为渗滤液的后续处理降低负负荷。屈阳[25]等以常州生活垃圾填埋场的原始垃圾为材料进行机械生物处理后对淋滤液进行分析, 指出淋滤液 COD:N:P = 261:5:3.6, 可生化性好。鞠茂伟[26]通过对大连市混合的城市生活垃圾机械生物处理后进行填埋和未处理的生活垃圾直接填埋的实验进行对比得出在未降水的情况下预处理过的垃圾不产生渗滤液, 模拟降水填埋过程处理过的垃圾产生的渗滤液 COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 等污染物浓度明显低于混合垃圾直接填埋。

大力推行城市垃圾分类。我国城市垃圾的一个典型特点就是含水量大, 燃值低, 这导致了渗滤的产生量也大。2019年6月《住房和城乡建设部等部门关于在全国地级及以上城市全面开展生活垃圾分类工作的通知》发布, 在全国大力推行垃圾分类, 将生活垃圾分为干垃圾、厨余垃圾、可回收垃圾、有害垃圾。通过垃圾分类后和原先的混合垃圾相比, 进入填埋场及焚烧厂的垃圾水分含量明显降低[27]。有害垃圾的单独处理也大大降低了雨水对垃圾堆体的冲刷过程中有害物质进入水体。因此大力推广垃圾分类有利于从源头实现渗滤液的减量。

4.2. 渗滤液资源化

虽然垃圾渗滤液成分复杂、水质波动大、含多种有毒有害的物质, 对环境危害大但是其中也不乏可以回收利用的组分。在技术成熟, 对渗滤液的特性了解清晰的情况下, 是可以考虑实现垃圾渗滤液资源化的。渗滤液中的腐植酸虽然是渗滤液难处理的一个因素但是也是植物生长所需要的营养物质, 可以考虑渗滤液的适当处理运用到农业当中。聂永丰等[28]研究了一种从渗滤液中分离腐植酸然后再浓缩为有机液体肥料的资源化工工艺。垃圾渗滤液含有高浓度氨氮, 是属于碱性液体, 对酸具有一定的缓冲作用, 可以用来调节土壤的酸碱度, 也可以用来焚烧厂的烟气脱硫。苏仕军等[29]指出在运用垃圾渗滤液脱硫 SO_2 的吸收率可达 90% 以上, 同时渗滤液中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度也从 $133 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $78 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

微生物电池(MFCs)通过微生物的呼吸代谢作用将环境中的有机物分解将化学能直接转换成电能。微生物电池的特点是不仅能将化学能转换成可以利用的电能, 而且能去除有毒有害物质不会产生二次污染。2006年, You 等[30]首次使用垃圾渗滤液作为 MFC 的底物, 研究了单室和双室垃圾渗滤液的处理效果。程李钰等[31]以难生物降解生化性能差的垃圾渗滤液为底物研究了电极面积对电池产电性能的影响。研究指出阳极与阴极面积比值为 2:2 的 MFC 输出电功率密度最大为 $237.65 \text{ mW}/\text{m}^2$, 内阻最小为 200; 生物阴极型 MFC 对阳极底物和阴极液的污染物均具有处理作用; MFC 对老龄垃圾渗滤液 COD 的去除率为 22.31%; 老龄垃圾渗滤液氨氮去除率分别为 80.88%。微生物电池能把垃圾渗滤液资源化利用但是也存在着输出功率低, 产电效率不高等缺点, 所以运用到实际当中技术还不够成熟, 需要进一步的优化。例如驯化提纯出产电性能高的微生物, 多个电池单元串联来提高电池的出电功率, 进一步研究出产电性能好, 除污能力高的最佳运行条件。

4.3. 无害化工艺的提升

2010年《生活垃圾填埋场渗滤液处理技术规范》(HJ564)的颁布对渗滤液的处理工艺提供了指导, 推出了“预处理 + 生物处理 + 深度处理”的渗滤液处理工艺。虽然该工艺能实现渗滤液的处理效果稳定、出水水质满足排放标准的要求, 但也存在工艺流程复杂、附属设施多、控制难度大、运行成本高且深度处理后的浓缩废水处理难的问题。因此目前的渗滤液处理工艺还有待提升, 未来渗滤液的处理需要追求处理效果好、工艺简单且运行成本低的工艺。

5. 结论

垃圾渗滤液是人类生活的必然产物。在未来的渗滤液的处理可以在大力推行城市垃圾分类处理的前

提下从源头控制渗滤液的产生, 实现渗滤液的“减量化”。然后继续根据实际情况设计出简单、经济及处理效果好的工艺来实现渗滤液无害化, 同时寻求渗滤液资源化利用的途径。最终逐步形成能实现渗滤液的“减量化 + 无害化 + 资源化”的综合处理对策。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(S202013614056)。

参考文献

- [1] 王璐. 电化学氧化法在垃圾渗滤液中的应用[J]. 山西建筑, 2015, 41(4): 199-202.
- [2] 徐昌文, 王声东. 垃圾渗滤液及膜滤浓缩液处理技术探讨与分析[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(5): 72-75.
- [3] 袁维芳, 王浩, 汤克敏, 等. 垃圾渗滤液处理技术及工程化发展方向[J]. 环境保护科学, 2020, 1(14): 76-83.
- [4] 代晋国, 宋干武, 等. 新标准下我国垃圾渗滤液处理技术的发展方向[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(3): 270-274.
- [5] Kurniawan, T.A., Lo, W.H. and Chan, G.Y.S. (2006) Physico-Chemical Treatments for Removal of Recalcitrant Contaminations from Landfill Leachate. *Journal of Hazardous Materials B*, **129**, 80-100. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010>
- [6] 张海霞. 垃圾渗滤液深度处理混凝剂的选择[J]. 广东化工, 2012, 39(5): 158-160.
- [7] 汤红妍, 苗娟, 李国芝, 等. MAP 法处理垃圾渗滤液的研究[J]. 工业安全与环境, 2014, 40(10): 1-4.
- [8] Li, W., Hua, T., Zhou, Q.X., et al. (2010) Treatment of Stabilized Landfill Leachate by the Combined Process of Coagulation/Flocculation and Powder Activated Carbon Adsorption. *Desalination*, **264**, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.004>
- [9] 李章良, 池新丽, 赫三毛, 等. 微波改性粉煤灰深度处理垃圾渗滤液的研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(3): 43-48.
- [10] 刘辉, 邹继颖, 孙大志, 等. 活化玉米芯活性炭-Fenton 试剂法处理高校垃圾渗滤液的研究[J]. 吉林化工学院学报, 2015, 32(6): 55-59.
- [11] Spagni, A. and Marsili-Libelli, S. (2009) Nitrogen Removal via Nitrite in a Sequencing Batch Reactor Treating Sanitary Landfill Leachate. *Bioresource Technology*, **2**, 609-614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.064>
- [12] 孙铁刚, 孙翼虎, 等. 生物增效结合 SBR-AO 处理垃圾渗滤液[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 345-350.
- [13] 欧阳科, 黎丽华, 陈媛, 等. 膜生物反应器(MBR)处理垃圾渗滤液的脱氮研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 706-710.
- [14] 王伟, 王芳, 杨丽萍. UASB 工艺在处理垃圾填埋场渗滤液的应用[J]. 广东化工, 2014, 41(23): 133-134.
- [15] 金永祥, 陶丽娟, 周展浩, 倪淑君. 复合式缺氧-好氧法处理晚期垃圾渗滤液研究[J]. 水处理技术, 2010, 2(36): 98-104.
- [16] 吴莉娜, 史袁, 张杰, 等. UASB1+A/O+UASB2 深度处理垃圾渗滤液[J]. 环境科学研究, 2015, 28(8): 1331-1336.
- [17] 李红, 任相浩, 寇荣荣, 等. 一种微生物菌剂处理垃圾渗滤液[J]. 生态科学, 2015, 34(6): 71-74.
- [18] 马昆. JS-BC 污水处理工艺研究进展[J]. 建筑与预算, 2015(10): 32-35.
- [19] Wiszniowski, J., Robert, D., Surmacz-Gorskaj, et al. (2006) Landfill Leachate Treatment Methods: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **4**, 51-61. <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0016-z>
- [20] 陈迪, 刘丹, 刘咏. Fenton 试剂处理难降解垃圾渗滤液的研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(1): 64-68.
- [21] Soraya, M., Abdul, A.H., Hasnain, L.M., et al. (2010) Statistical Optimization of Process Parameters for Landfill Leachate Treatment Using Electro-Fenton Technique. *Journal of Hazardous Materials*, **176**, 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.099>
- [22] 刘卫华, 季民, 张昕, 等. 催化臭氧氧化去除垃圾渗滤液中难降解有机物的研究[J]. 环境化学, 2007, 26(1): 58-61.
- [23] Lei, Y., Shen, Z., Huang, R., et al. (2007) Treatment of Landfill Leachate by Combined Aged-Refuse Bioreactor and Electro-Oxidation. *Water Research*, **41**, 2417-2426. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.044>
- [24] Trois, C., Griffith, M., Brummack, J., et al. (2007) Introducing Mechanical Biological Waste Treatment in South Africa: A Comparative Study. *Waste Management*, **27**, 1706-1714. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.013>

-
- [25] 屈阳, 张进峰, 等. 城市生活垃圾机械生物处理效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 401-406.
- [26] 鞠茂伟. 混合垃圾机械生物预处理燃烧和填埋特性研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [27] 熊彩虹, 李文彬, 陈娟, 张昕, 等. 垃圾分类对焚烧厂的影响——以沿海某地生活垃圾焚烧厂为例[J]. 广东化工, 2020, 12(47): 145-147.
- [28] 聂水丰, 许玉东, 岳东北. 城市生活垃圾填埋场渗滤液的资源化工[P]. 中国专利, CN1G48075. 2004.
- [29] 苏仕军, 万海清, 朱家骅, 等. 垃圾渗滤液烟气脱硫-pH 值、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的影响机理研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 37-42.
- [30] You, S.J., Zhao, Q.L., Jiang, J.Q., *et al.* (2006) Sustainable Approach for Leachate Treatment: Electricity Generation in Microbial Fuel Cell. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **41**, 2721-2734.
<https://doi.org/10.1080/10934520600966284>
- [31] 程李钰, 徐龙君. 电极面积对老龄垃圾渗滤液为底物的微生物燃料电池性能影响[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(8): 11-18.