

垃圾渗滤液处理技术综述与展望

曹浩然 孙传荣 韩克强 穆雨彤 张道扬

黑龙江大学 建筑工程学院

DOI:10.12238/eep.v7i3.2002

[摘要] 垃圾渗滤液的处理始终是水处理领域备受瞩目的焦点与难解之题。本文简单探讨了渗滤液的形成机制及其独特的水质特性,并对现有的处理方法进行了系统的分类。我们深入剖析了近年来在渗滤液处理中广泛应用的物化方法和生化方法,并简要评价了它们各自的优点和不足。在众多的处理方法中,生化方法以其卓越的处理效果成为渗滤液处理的核心技术。相较之下,渗滤液的预处理及深度净化过程则主要靠物化过程来实现。展望未来,深入挖掘生化工艺潜力,尤其是着眼于渗滤液脱氮活性污泥法效率的提升,将成为渗滤液处理技术发展的主攻方向。我们期待通过不断的探索与创新,能够研发出更为高效的渗滤液处理方案,从而为环境保护和可持续发展贡献我们的一份力量。

[关键词] 垃圾渗滤液; 物化处理; 生物处理; 脱氮

中图分类号: G633.91 **文献标识码:** A

Research progress in landfill leachate treatment technology

Haoran Cao Chuanrong Sun Keqiang Han Yutong Mu Daoyang Zhang

School of Civil Engineering, Heilongjiang University

[Abstract] The treatment of leachate from garbage has always been a focus of attention and a difficult problem in the field of water treatment. This article briefly explores the formation mechanism of leachate and its unique water quality characteristics, and systematically classifies existing treatment methods. We conducted an in-depth analysis of the physicochemical and biochemical methods widely used in leachate treatment in recent years, and briefly evaluated their respective advantages and disadvantages. Among numerous treatment methods, biochemical methods have become the core technology for leachate treatment due to their excellent treatment effects. Relatively speaking, physicochemical methods are more commonly used in the pretreatment and deep purification stages of leachate. Looking ahead to the future, how to further tap into the potential of biochemical processes, especially in improving the denitrification efficiency of activated sludge method for leachate, will be an important direction for the development of leachate treatment technology. Through continuous research and innovation, we look forward to finding more efficient solutions for leachate treatment, contributing to environmental protection and sustainable development.

[Key words] Garbage leachate; Physical and chemical treatment; Biological treatment; Denitrification

垃圾渗滤液是渗滤的雨水、废物生物降解产生的水和废物中固有的水的混合物,其中含有大量的溶解有机物(DOM)、盐、重金属离子和其他有机化合物(例如氯化脂肪族和杀虫剂)^[1]。垃圾填埋场的期龄不仅影响垃圾渗滤液的成分和性质,而且还对垃圾渗滤液的处理方法和处理效果有着重要影响。根据填埋年限的不同,垃圾渗滤液可分为三类:填埋时间小于5年的被称为年轻垃圾渗滤液,5-10年的为中期垃圾渗滤液,而10年以上的则被归类为老龄垃圾渗滤液^[2]。

当垃圾渗滤液在不经处理或者处理效果不好的情况下任意的释放到自然环境中时,其中含有的有毒有害物质可能会使

生态系统和人的健康受到重大危害影响^[3]。因此垃圾渗滤液的研究是十分必要且具有现实意义的。

1 垃圾渗滤液主要处理

当前,对垃圾渗滤液的主要处理技术为化学或物理过程、生物过程(包括好氧或厌氧)、物理-化学和生物的联合处理

1.1 化学和物理过程。生物处理在去除某些物质(如金属或难降解的卤化生物有机物(AOX))方面的效率相对较低。因此,推荐采用物理-化学处理,以去除稳定渗滤液中的难降解物质,并可作为生物处理渗滤液的前置步骤,如混凝沉淀、膜过滤和Fenton法。

混凝法已应用于处理垃圾渗滤液,在降低浊度、悬浮物、COD、色泽、重金属和腐殖质方面具有优势。蒋等人将Fenton法与混凝相结合,以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为絮凝剂,在 H_2O_2 投加量、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量和pH分别为1.1%、0.4%、3.2时,对COD去除效果为59.06%^[4]。Ibrahim和Yaser等人使用单宁基混凝剂和聚丙烯酰胺(PAM)作为絮凝剂来研究垃圾渗滤液中混凝/絮凝处理的颜色去除。当pH值为5时,最佳剂量可达到最高的脱色效率(81.8%)^[5]。

膜分离工艺(MSP),主要是反渗透处理,被认为是将渗滤液处理到符合法规的标准以及更有效和适应性更强的最合适的方法。Wu等学者采用碟管式反渗透系统对高盐分垃圾渗滤液进行处理,取得了超过83%的水回收率,并实现了碳质和氮质污染物的达标排放。此外,该系统有效去除了大多数盐类(如 Cl^- 和 SO_4^{2-})以及难降解的有机物(如腐殖质和富里酸),使出水电导率下降至0.15~0.22 mS/cm ^[6]。此外,相较于反渗透(RO),纳滤(NF)具有更高的通量且仅需在低压下运行,由此降低了运行成本,使其在实际工程中得到更广泛的应用。例如,中空纤维纳滤膜系统在处理完一股废水后,通过0.01 mol/L HCl的洗涤,可将膜通量恢复至96%以上^[7]。

高级氧化工艺(AOPs)对水中抗性有机化合物表现出了十分优秀的去除能力。因为AOPs在废水处理领域的适用范围广,处理效果好,其同样也成为垃圾渗滤液处理的有效方法。在面对众多的AOPs技术,Photo-Fenton工艺在对生物预处理垃圾填埋场浸出物的处理方面以其出色的性能脱颖而出。有研究发现它对COD去除率为86%,这显示了渗滤液中大量有机污染物被有效分解和去除。同时,该工艺还能实现超过95%的颜色去除率,显著改善了垃圾渗滤液的外观,使其更加接近于清洁水质^[8]。Mohan等人将基于臭氧和过氧酮($\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}_2$)的高级氧化工艺来处理垃圾渗滤液。将参加反应的时间、 O_3 的用量的影响和 H_2O_2 浓度对COD去除的效率、垃圾渗滤液能否更好的被生物降解性和pH值是否发生变化的影响确定为处理过程的性能参数。发现单独使用臭氧(3975 mg/L)和使用臭氧(9275 mg/L)+50 $\text{mg}/\text{LH}^+\text{O}_2^-$ 各120分钟的最大COD去除效率为46%和82%^[9]。

综合看来,物化法在处理效果稳定可靠,保障出水质量方面有着十分显著的优势。但是,其容易造成二次污染的缺点也不应该被忽视。并且很多物化方法只聚焦于特定污染物的清除。例如,氨吹脱法作为一种典型的物化方法,其主要目标是去除渗滤液中的氨氮成分,而对于其它污染物的去除效果则非常有限。这种局限性使得当使用物化方法处理有着复杂成分的渗滤液时,无法达到理想的净化效果。相反,絮凝沉淀、高级氧化和吸附剂吸附等技术则对氨氮的去除效果并不尽如人意,因为它们主要是对有机物的去除。此外,尽管膜过滤法能有效清除多数污染物,但成本高且膜浓缩液的处理颇具挑战。因此,在实际应用中,通常需要结合多种物化方法或与其他处理技术相结合,以实现渗滤液中多种污染物的全面清除。同时,也需要不断研发新的物化方法,以提高其对渗滤液中不同污染物的去除效率,从而更

好地满足环境保护的需求。

1.2生物过程(好氧或厌氧)。对于垃圾渗滤液中高浓度有机物,生物法是一种便捷、可靠、经济的方法。微生物通过好氧条件下把有机物分解成污泥和 CO_2 ,而在厌氧条件时,有机物则被分解为 CO_2 和 CH_4 。

针对早期或中期的垃圾渗滤液,由于其特有的高碳氮比特性,通常我们不会直接选择物化方法进行处理,而是更倾向于采用传统的硝化/反硝化工艺或改进工艺(如UASB+A/O耦合工艺和内源性反硝化工艺)来处理^[2]。这些工艺对渗滤液的特性利用十分充分,有效去除氮和有机物,为后续的其他处理提供了良好的基础。然而,在好氧过程中利用有机物质导致随后缺氧反硝化的碳供应严重短缺的传统的硝化-反硝化(生物)工艺通常不适合处理低C/N比(通常为<3)的成熟渗滤液^[10]。

厌氧氨氧化,即厌氧氨氧化技术,是一项极具潜力和成本效益的新型处理工艺。相较于传统的硝化/反硝化方法,Anammox工艺无需依赖外部碳源,且能大幅度减少能源消耗。因此,它被视为处理成熟垃圾渗滤液的高效手段,备受业界瞩目^[2]。

Ren等人在处理成熟垃圾渗滤液的连续活流系统中,成功实施了一级PNA耦合PDA工艺。当NLR保持在0.33~0.36 kgN/m^3 时,成功去除了97.9%~98.1%的 TN/d ,其中厌氧氨氧化对氮去除的贡献达到了89.8%~92.4%。通过长期原位FA缺氧处理,有效地抑制了NOB,并促进了参与水解和酸化过程的多种细菌的富集^[11]。Qiu等人成功建立了部分硝化-厌氧氨氧化(PNA)和部分反硝化-厌氧氨氧化(PDA)两阶段联合工艺,以实现垃圾渗滤液的深度脱氮。该系统的脱氮效率(NRE)为 $97.6 \pm 1.5\%$,其中PNA和PDA分别贡献了 $74.8 \pm 4.0\%$ 和 $18.7 \pm 4.1\%$ ^[12]。

生物法在垃圾渗滤液处理中占据核心地位,能有效去除其中的可生化有机物。但出水常残留难降解的大分子有机物,需结合其他方法深化处理,确保达标排放。当前,生物法脱氮的经济高效性成为研究热点与难点。短程硝化反硝化、厌氧氨氧化及内源反硝化等方法,均为生物法深度脱氮处理渗滤液的探索途径。在高效脱氮方面,我们仍需持续深入研究与实践,以推动技术进步。

1.3物理-化学和生物的联合。目前,由于传统的废水处理工艺无法达到令人满意的水平来降解存在的有毒物质,因此没有单一的单元工艺可用于适当的渗滤液处理。在不同地区和不同的渗滤液污染物浓度下,组合处理是处理渗滤液切实可行的有效方法。目前,已经采用了几种技术来降解这种高度多样化的有机废水,并表现出不同程度的效率。

Oumar等人的研究发现,垃圾渗滤液可以用电絮凝-生物过滤混合技术来处理,并且电絮凝对COD去除率为 $37 \pm 2\%$,这是因为不溶性COD和HA是渗滤液中的主要有机物,后续的生物过滤过程中去除 $42\% \pm 7\%$ 的COD^[13]。Chen等人在SAARB与臭氧化结合的研究中发现,臭氧化过程显著降低了成熟和年轻SAARB废水中苯环化合物的疏水性和浓度,使SAARB废水的生物降解性得到了极大的改善^[14]。Ghanbari等通过电凝(EC),电氧化(EO)和过氧一硫酸盐(PMS)/UV/ CuFe_2O_4 用于处理垃圾渗滤液。结果表

明, EC, EO和SR-AOP的COD去除效率分别高达60.0%, 50.0%和77.9%。对于COD, TOC, BOD和氨气(NH₄), 该顺序过程的去除效率分别为95.6、90.5、91.6和99.8%。根据BOD/COD比和碳的平均氧化态(AOSC), 可生物降解性得到显著提高。

与此同时, 随着时代的发展, 在垃圾渗滤液处理方面, 一些新的组合技术也在不断发展, 并取得了不错的进展, 例如, 近几年紧密耦合光催化和生物降解(ICPB)系统因为对有机物特别是难降解有机物的去除效率高, 系统比较稳定而备受人们的关注。它是一种让高级氧化中的光催化和好氧生物处理相结合, 并使它们同时发生的技术, 既可以利用光催化提高难降解有机物的可生物降解性, 还可以利用微生物来降低处理成本。ICPB系统主要由一个光反应器和一些多孔载体组成, 这些载体外有光催化剂, 内有生物膜。光催化反应生成的高反应性化学氧化剂(即 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$)可以将持久性和不可生物降解的有机物质转化为易于生物降解的有机产物, 细菌生物膜在受保护的区域积累, 可生物降解产品一经生产后立即被微生物生物降解。

Li等人的研究表明, 通过改性可见光响应性的gC₃N₄, 以立方聚氨酯海绵作为载体, 可以显著提高环丙沙星的去除效率。在此基础上, 他们进行了光催化生物降解实验, 成功去除了94%的环丙沙星, 并鉴定了12种降解产物及可能的降解途径。相比于单纯的光催化降解, 光催化生物降解的总有机碳(TOC)去除率提高了1.57倍。

正如其他研究报告所指出的, 传统的处理方法不足以获得较高的污染物去除率, 因为不存在灵活、通用的垃圾填埋场渗滤液处理方法; 相反, 它应该根据实际情况来处理。

2 结论

如本文所述, 垃圾渗滤液是一个复杂的问题, 可以通过多种技术来解决。环境、经济、社会和季节变化只是影响渗滤液处理选择的几个特征, 这使得新项目的开发对工程师和当地决策者来说是一个真正的挑战。

过往研究已着重指出, 仅凭传统的化学/物理或生物处理手段单独应对垃圾渗滤液颇具挑战, 原因在于高分子量有机物的占比偏高以及重金属的存在对生物过程产生抑制作用。这均表明, 要实现高污染物去除率, 必须融合多种技术。事实上, 生物处理确实有助于削减有机污染物, 但它在降低垃圾渗滤液中常见的重金属浓度或无机化合物方面则显得力不从心。相对地, 物理化学处理在处理新生渗滤液时亦显捉襟见肘, 因其难以有效减少有机物成分。因此, 单独依赖某一技术对于降低渗滤液污染物含量而言并无太大裨益, 建议采用综合方案, 以达到水体排放的监管标准。

[参考文献]

[1] Liu, Z., Wu, W., Shi, P., Guo, J., Cheng, J., 2015. Characterization of dissolved organic matter in landfill leachate during the combined treatment process of air stripping, Fenton, SBR and coagulation. *Waste Manage.* 41, 111–118.

[2] Miao, L., Wang, S., Li, B., et al. Advanced nitrogen removal via nitrite using stored polymers in a modified sequencing batch

reactor treating landfill leachate[J]. *Bioresource technology*, 2015, 192: 354–60.

[3] Thomaidi, V.S., Gatidou, G., Kalantzi, O.I., Thormaidis, N.S., S. tasinakis, A.S., 2020. Wide-scope target analysis of emerging contaminants in landfill leachates and risk assessment using Risk Quotient methodology. *J. Hazard Mater.* 394, 122493.

[4] 蒋贞贞, 朱俊任. Fenton-混凝法预处理垃圾渗滤液工艺研究[J]. *化工设计通讯*, 2021, 47(04): 60–61.

[5] Ibrahim and Yaser, 2019. A. Ibrahim, A.Z. Yaser Colour removal from biologically treated landfill leachate with tannin-based coagulant. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7(2019).

[6] Wu, C.W., Li, Q.B. Characteristics of organic matter removed from highly saline mature landfill leachate by an emergency disk tube-reverse osmosis treatment system[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128347.

[7] Li, G., Wang, W., Du, Q. Applicability of nanofiltration for the advanced treatment of landfill leachate[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 116(4): 2343–2347.

[8] Primo, O.; Rivero, M.J.; Ortiz, I. Photo-Fenton process as an efficient alternative to the treatment of landfill leachates. *J. Hazard Mater.* 2008, 153, 834–842.

[9] KANMANI, NIVETHIDHA, JEYANTHI, et al. OPTIMISATION STUDIES ON COAGULATION-FLOCCULATION OF LEACHATE USING TAMARIND SEEDS[J]. [2024-03-14].

[10] Miao, Lei, Wang, Shuying, Cao, Tianhao, Peng, et al. Advanced nitrogen removal from landfill leachate via Anammox system based on Sequencing Biofilm Batch Reactor (SBBR): Effective protection of biofilm[J]. *Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies*, 2016, 220.

[11] Ren, S., Yang, P., Zhang, F., Jiang, H., Wang, C., Li, X., Zhang, Q., Peng, Y. 2022. Continuous plug-flow anammox system for mature landfill leachate treatment: Key zone for anammox pathway. *Bioresource Technology*, 363, 127865.

[12] Jiang, H., Peng, Y., Li, X., et al. Advanced nitrogen removal from mature landfill leachate via partial nitrification-Anammox biofilm reactor (PNABR) driven by high dissolved oxygen (DO): Protection mechanism of aerobic biofilm[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123119–.

[13] Dia, Oumar, Drogui, et al. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment[J]. *Waste Management*, 2018.

[14] Chen, W., Zhang, A., Jiang, G., et al. Transformation and degradation mechanism of landfill leachates in a combined process of SAARB and ozonation[J]. *Waste Management*, 2018, 85(FEB.): 283–294.