

垃圾渗滤液微生物脱氮所需营养剂的性能评价

冯春晖, 石伟杰, 李雁鸿, 马 凯, 周继柱, 王国瑞

神美科技有限公司, 北京

收稿日期: 2022年5月23日; 录用日期: 2022年6月20日; 发布日期: 2022年6月30日

摘 要

近年来, 随着国家对环保要求的提高, 对垃圾渗滤液的处理标准也越来越高。考虑到垃圾渗滤液高TN、高NH₃、高COD、高盐分等特征, 生化法依然是必不可少的处理环节之一。其中微生物脱氮所需的外加营养剂不仅要能适应垃圾渗滤液不断变化的特殊水质, 更要与现场工艺达到最佳的匹配性。通过实验室模拟某垃圾渗滤液填埋场的处理工艺, 对比了不同营养剂的脱氮效果, 发现高COD当量的复合型碳源营养剂可以更好地适应垃圾渗滤液水质特征, 保持较高的反硝化效率, 维持系统的碱度平衡, 提高系统的脱氮效果, 并且可生化性较强, 残留COD降低, 极大地提高了系统处理的效果和稳定性。

关键词

垃圾渗滤液, 微生物, 脱氮, 营养剂

Performance Evaluation of Nutrients Required for Microbial Denitrification of Landfill Leachate

Chunhui Feng, Weijie Shi, Yanhong Li, Kai Ma, Jizhu Zhou, Guorui Wang

Smedic Technology Co., Ltd., Beijing

Received: May 23rd, 2022; accepted: Jun. 20th, 2022; published: Jun. 30th, 2022

Abstract

In recent years, with the improvement of the country's environmental protection requirements, the treatment standards for landfill leachate are also getting higher and higher. Considering the high TN, high NH₃, high COD, high salinity and other characteristics of landfill leachate, biochemical method is still one of the essential processing links. Among them, the additional nutrients required for microbial denitrification should not only adapt to the changing special water quality of landfill lea-

chate, but also achieve the best match with the on-site process. The denitrification effect of different nutrients was studied by simulating the treatment process of a landfill leachate in the laboratory. It is found that the composite carbon source nutrient with high COD equivalent can better adapt to the water quality characteristics of landfill leachate, maintain a high denitrification efficiency, maintain the alkalinity balance of the system, improve the denitrification effect of the system, and has strong biodegradability and reduced residual COD, which greatly improve the system processing effect and stability.

Keywords

Landfill Leachate, Microorganisms, Denitrification, Nutrients

Copyright © 2022 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. 前言

垃圾渗滤液指的是垃圾在堆放、填埋的过程中产生的一类高浓度废水，一般为黄褐色且伴随刺激性恶臭味道，已成为水环境保护的热点问题[1]。垃圾渗滤液的组成与多种因素有关，包括填埋场的填埋时间，填埋技术方式，当地的降雨量及垃圾的种类等，研究发现垃圾渗滤液的水质组成随着填埋时间的延长而变得更加复杂，垃圾渗滤液中至少包含了上百种有机物，还包含了其它的一些重金属和无机物，严重的会导致水生生物中毒等危害[2] [3]。

生化法处理垃圾渗滤液被公认为最有效的处理方法[3]，其中微生物脱氮依然是依靠反硝化细菌利用外加的营养剂将渗滤液中的硝态盐和亚硝酸盐还原成氮气，最终达到脱氮的效果。国外对营养剂的研究主要是固体碳源、气体碳源和工业废水等，国内目前常用的营养剂一般为糖类、甲醇、乙酸、乙酸钠等单一成分的营养剂[4] [5]。对于垃圾渗滤液高 TN、高氨氮、高 COD、高盐分的水质特征，往往单一营养剂很难有效适应系统，因此研究适用于垃圾渗滤液的复合营养剂显得尤为重要。

本研究通过室内模拟某垃圾填埋场垃圾渗滤液生化法的处理工艺，采用多级 AO 模型，对生化段系统脱氮所需不同的营养剂性能进行对比研究，旨在指导现场工艺找到最佳的营养剂产品，实现最佳的脱氮处理效果。

2. 材料及方法

2.1. 垃圾渗滤液水质和接种污泥

垃圾渗滤液取自某垃圾填埋场的垃圾渗滤液，污泥取自现场生化段二级硝化末端的活性污泥，水质指标如下表 1 所示。

Table 1. Landfill leachate water quality index

表 1. 垃圾渗滤液水质指标

项目	垃圾渗滤液				硝化末端活性污泥		
名称	pH	NH ₃ -N (mg/L)	TN (mg/L)	COD (mg/L)	MLSS (未减盐分)	MLSS (减盐分)	SV ₃₀ (%)
均值	8.20	2100	2350	6100	36,500	11,100	99

2.2. 实验装置

实验模型采用的是有机玻璃制成的圆柱体，根据现场工艺选择不同大小的模型，同时配备有搅拌装置、曝气装置、温控装置、流量计等。装置模型如图 1 所示。模拟现场的生化处理段，包括进调节池 + 一级反硝化 A + 一级硝化 O + 二级反硝化 A + 二级硝化 O + 外排出水。现场外排出水进入了下一级物理处理单元，包括超滤和反渗透等设备，但本次实验室研究的重点是生化段的营养剂性能，所以并未模拟后段的物理处理设备。

实验模拟现场的工艺参数：一级反硝化池的池容是二级反硝化池的 2 倍，一级硝化池的池容是二级硝化池的 6 倍；内回流是从一级硝化池至一级反硝化池，回流比是 200%；外回流是从二级硝化池至一级反硝化池，回流比是 100%；一级反硝化停留时间 4 h，由于二级处理池容较小，水力停留时间非常短，所以没有设置内回流；反硝化池的溶解氧控制在 1~2 mg/L，硝化池的溶解氧控制在 3~4 mg/L。

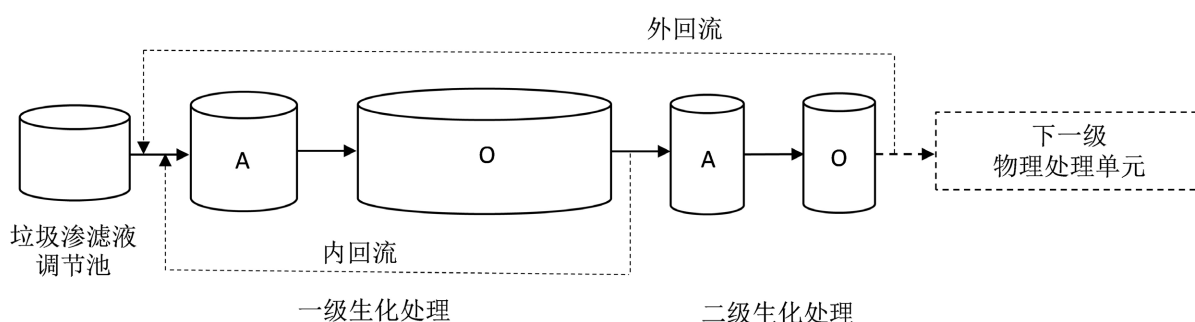


Figure 1. Schematic diagram of the multi-stage AO biochemical denitrification treatment model

图 1. 多级 AO 生化脱氮处理模型示意图

2.3. 检测项目

水样分析中的 COD 检测采用的是联华水质快速测定仪；氨氮、硝态氮和总氮的测定采用的是离心机泥水分离后，用紫外分光光度计法测上清液；温度、pH 和 DO 采用的便携式检测仪器直接读数测量。

3. 实验数据与分析

3.1. 实验一：实验室与现场工艺运行效果的拟合

在实验室条件下模拟现场工艺，进行垃圾渗滤液的生化处理调试，其目的是为了通过对比实验室数据和现场数据，拟合实验室工艺条件和现场工艺条件，以便在实验室进行后续的性能对比优化研究。

现场使用的碳源是液体乙酸钠，COD 当量为 22 万 mg/L，外加碳源与进水 TN 的 C/N 比约为 4.06:1。考虑到污泥在实验室条件下的启动、培养和驯化时间，实验期间不断检测沿程数据变化，控制排水比，直至系统相对稳定。从现场选取了 10 批次水质参数波动不大的垃圾渗滤液，按照上述条件在实验室条件下进行模拟生化处理，通过不断的检测沿程数据，适当微调生化段的工艺参数，尽可能的使得实验室工艺条件下的生化处理效果与现场工艺条件的生化处理效果吻合。现场不同批次调节池的水质参数如表 2 所示。

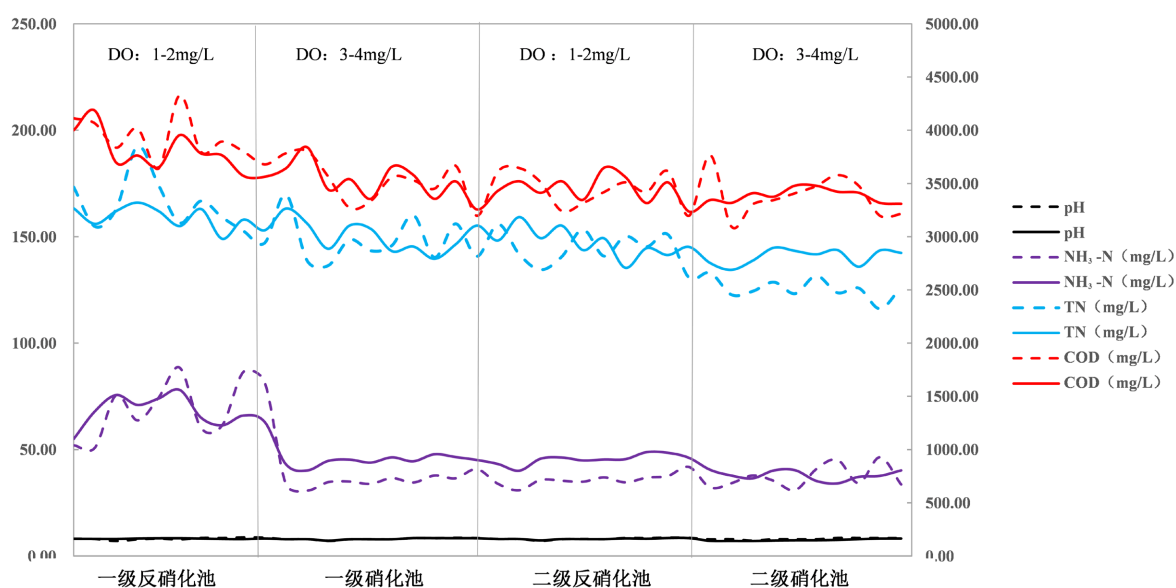
实验过程中取不同反应池中部位位置的泥水样，连续测量水质中的 DO、pH、NH₃、TN 和 COD 数据，通过不断的统计实验室数据与垃圾渗滤液现场实际运行的相关数据进行对比，以此来反馈调整实验室的运行参数，直至两者的数据相对吻合，即得到如图 2 所示的变化曲线图，实线表示的是拟合后实验室每个反应池 10 日的检测数据，虚线表示的是拟合后现场反应池 10 日的检测数据。

Table 2. Parameter table of landfill leachate in conditioning tank
表 2. 调节池的垃圾渗滤液参数表

批次	pH	NH ₃ -N (mg/L)	TN (mg/L)	COD (mg/L)
1	8.28	2006.80	2254.60	6374.80
2	8.35	2133.80	2218.90	5979.80
3	8.19	2263.50	2301.50	6184.50
4	8.23	2228.40	2587.80	5990.60
5	7.98	2036.50	2324.00	5924.70
6	8.12	2094.60	2124.00	5940.30
7	8.17	2016.20	2473.00	5864.40
8	8.23	2120.30	2372.40	5845.80
9	8.23	2089.20	2490.80	6964.90
10	8.27	2081.10	2234.70	6751.90

从图 2 可以看出, 经过实验室连续的调试后, 基本可以实现生化段的处理效果与现场条件下的处理效果相吻合。实验室建立的动态生化处理模型基本可以模拟现场的条件, 从而满足后续实验室对不同营养剂性能的模拟对比优化研究。

从沿程数据分析可以看出: 垃圾渗滤液的生化脱氮处理效果基本只发生在一级生化处理阶段, 由于二级生化段的停留时间较短, 二级生化处理脱氮效果明显减弱。所以重点针对一级生化段进行反硝化脱氮营养剂的性能对比研究。



备注: 虚线代表现场数据, 实线代表实验室条件的模拟数据

Figure 2. Fitting curve between laboratory simulation data and field operation data

图 2. 实验室模拟数据与现场运行数据的拟合曲线图

3.2. 实验二: 反硝化脱氮营养剂的性能对比

为研究不同类型的营养剂对该类型垃圾渗滤液的反硝化脱氮能力, 在实验一的基础上选取了乙酸钠

溶液、甲醇、葡萄糖固体、110 万 COD 当量的复合碳源四种营养剂产品, 利用多级 AO 生化脱氮模型进行室内性能对比实验, 按照同等 COD 折算投加, 其余条件控制与实验一相同。研究各生化段的 $\text{NO}_3\text{-N}$, pH, NH_3 , TN, COD 指标随时间的变化情况进行不同类型的营养剂的性能分析与评价。

1) 一级反硝化池 $\text{NO}_3\text{-N}$ 数据对比

营养剂的投加点位位于一级反硝化池前端, 其中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 数据是作为营养剂反硝化效果最直接最方便的指标之一[6]。实验过程中, 以一级反硝化池的剩余 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量来判断不同营养剂投加后的反硝化效果, 得到如下图 3 所示的投加不同营养剂后, 一级反硝化池 10 日的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量随时间变化曲线图。从数据曲线图可以看出, 按照同等投加 C/N 进行的实验, 反硝化效果最好的是复合碳源, 在系统运行几天后, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量快速降低并趋于稳定, 其次是乙酸钠, 但该系统反硝化效果不太稳定, 说明抗冲击和波动的能力较弱。而葡萄糖较差, 系统残留的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较高, 葡萄糖属于大众微生物都易于吸收的一类营养剂[7], 但由于其较大的分子结构, 微生物需要先将大分子转换成小分子方可吸收, 这就需要反硝化的停留时间足够长, 而实验证明针对该系统, 葡萄糖并不能最大化的发挥作用。甲醇的反硝化效果最差, 这也是甲醇自身的特性决定, 甲醇通常的驯化期较长, 而该实验也说明甲醇并不能适应该水质和处理系统。

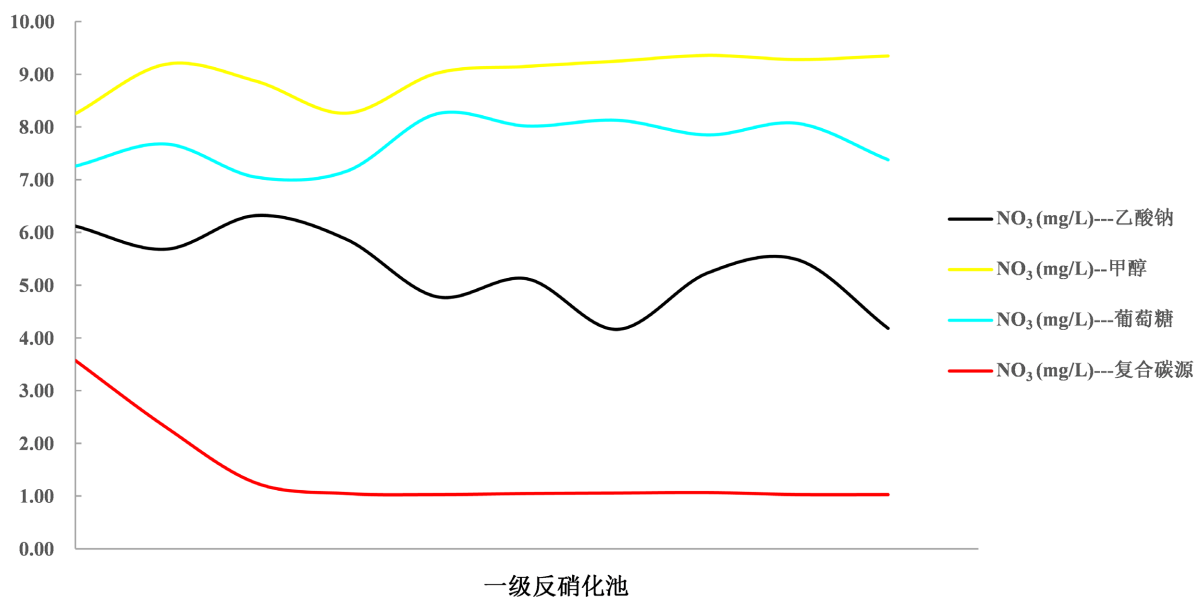


Figure 3. Comparison of data curves of $\text{NO}_3\text{-N}$ in primary denitrification tank with time

图 3. 一级反硝化池中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 随时间变化的数据曲线对比图

2) 各生化池 pH 值数据对比

反硝化细菌是一类异样兼性缺氧型微生物, 利用有机营养物质作为反硝化的电子供体进行反硝化[8]。通常每转化 $1\text{gNO}_3\text{-N}$ 为 N_2 时, 需有机物(以 BOD 表示) 2.86g 。同时产生 3.57g 重碳酸盐碱度(以 CaCO_3 计)。而硝化反应每氧化 1g 氨氮耗氧 4.57g , 消耗碱度 7.14g , 表现为 pH 值下降[9]。所以需要维持较高的反硝化效率以弥补整个系统 pH 的增减。

实验过程中依靠便携式检测仪实时监测各个反应池中部的 pH 变化, 得到如下图 4 所示的投加不同营养剂后, 各个反应池 10 日的 pH 值随时间变化曲线。从 pH 数据曲线图可以看出, 维持系统 pH 值最佳的是乙酸钠, 其次是复合碳源和葡萄糖, 而效果最差的是甲醇, 甲醇投加后, 各生化段的 pH 呈现逐渐下降的趋势, 进一步验证了投加甲醇的反硝化池中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留最多的原因, 因为甲醇与该水质和系统的

不匹配,反硝化效果逐渐变差,pH补充不足而导致系统pH值逐渐下降的恶性循环。虽然葡萄糖被微生物吸收需要时间,但仍然可以维持一定的反硝化效率,贡献一定的pH值,能使系统pH值不会出现大幅度的波动。考虑到乙酸钠(约22万)和复合碳源(约110万)的COD当量值相差比较大,在折算同等COD投加量的时候,乙酸钠投加的体积量约是复合碳源的5倍,得益于乙酸钠溶液本身显中性的特点,所以仅从pH分析,乙酸钠的维持能力更强。但作为反硝化效率最高的复合碳源,为弥补这一劣势,在确保反硝化效果的同时,可以适当调高复合碳源的pH值,以满足整个硝化反硝化系统对pH值的需求。

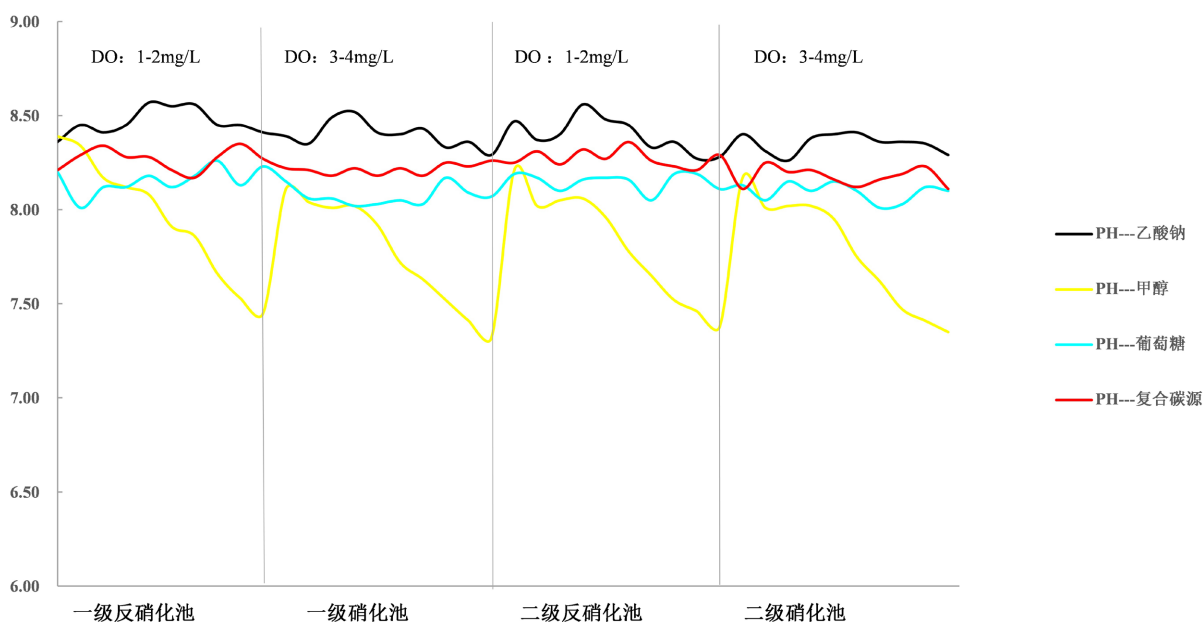


Figure 4. Data curve comparison of pH value in each biochemical tank with time

图4. 各段生化池中pH值随时间变化的数据曲线对比图

3) 各生化池 NH_3 和 TN 数据对比

营养剂不仅仅是参与微生物的反硝化过程,与系统匹配性好的营养剂也会对整个微生物菌群的活性起到一定的积极作用。总氮 TN 的去除是需要硝化和反硝化环节紧密的配合,硝化受到抑制或者反硝化不彻底[10],都会造成 TN 值无法降低。

实验过程中,不断检测系统中各个反应池的氨氮和 TN 数据,得到如图5所示的投加不同营养剂后,各个反应池10日的 NH_3 和 TN 含量随时间变化曲线,从曲线可以看出由于复合碳源具备最佳的反硝化效率和维持较高的pH值的能力,其 TN 数据降低至最低,说明了其对硝化和反硝化的促进作用,确保了两个环节都能进行的彻底。而乙酸钠虽然具备维持较高pH值的能力,但由于其反硝化往往不彻底,只将 $\text{NO}_3\text{-N}$ 还原为 $\text{NO}_2\text{-N}$,却未完全转换为 N_2 排除系统外,所以导致最终的脱氮能力弱于复合碳源。而葡萄糖和甲醇由于对该水质和系统的匹配性较差,无论是反应速率还是反硝化进行的程度上都收到抑制,导致 TN 数据偏高。

4) 各生化池 COD 数据对比

通常为了检测方便,营养剂的评价指标中只检测 COD_{cr} 当量,而不检测 BOD_5 。实际能被微生物有效利用的是 BOD_5 的占比,通常 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{cr}}$ 要维持在0.45以上[11],否则可生化性较差,不易被微生物吸收,也会造成系统水质的指标较高。

实验过程中,不断检测系统中各个反应池的 COD 数据,得到如图6所示的投加不同营养剂后,各个反应池10日的 COD 含量随时间变化曲线,从数据曲线图可以看出,投加复合碳源的系统中 COD

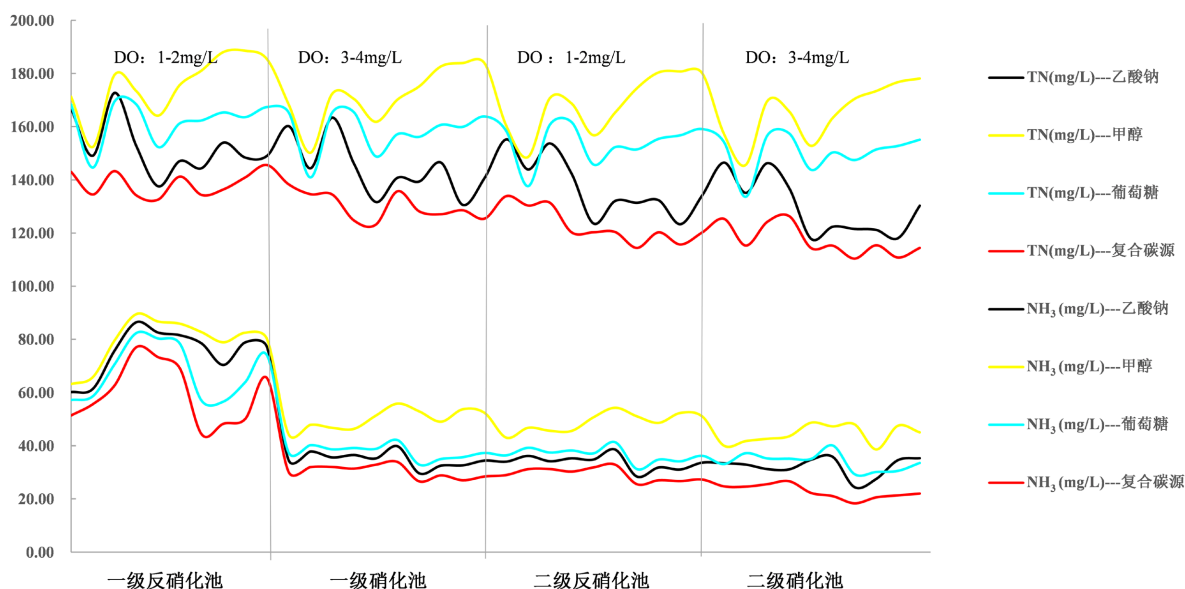


Figure 5. Comparison of data curves of NH_3 and TN in each biochemical tank with time
图 5. 各段生化池中 NH_3 和 TN 随时间变化的数据曲线对比图

含量维持在最低的水平，降低了系统后端的物理处理单元负荷。这也表明微生物可以更好的消化吸收该类复合碳源营养剂，这也是复合碳源营养剂的优势所在，可以根据不同的水质、工艺条件，优化自身配比，使其最大化的满足水质和工艺的需求，从而发挥最高的性价比。而乙酸钠、葡萄糖、甲醇由于其单一的组分，无法提供均衡的营养比，可生化性效果弱，残留 COD 也相对较高。

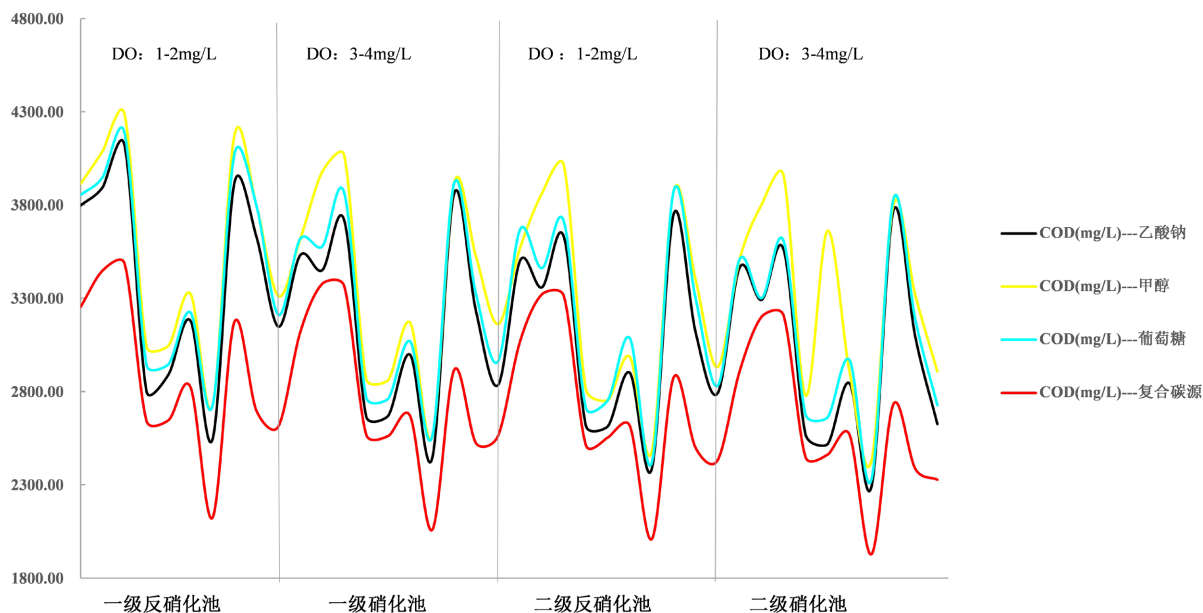


Figure 6. Data curve comparison of COD changes with time in each biochemical tank
图 6. 各段生化池中 COD 随时间变化的数据曲线对比图

4. 结论

针对该垃圾渗滤液微生物法脱氮处理工艺，不同的外加营养剂产品表现出不同的处理效果。其中高

COD 当量复合碳源营养剂的投加可以实现较高的反硝化效率,有助于硝态氮彻底被还原为氮气排除系统之外;同时可以确保系统 pH 值的稳定,以满足硝化的碱度需求;并且复合碳源的投加可以明显提升微生物群体的活性[12],有助于大幅度降低系统的 TN 和 COD;同时为微生物提供可生化性较强的复合碳源营养剂,可以保持污泥较高的活性和沉降性能,极大地减轻了后端超滤的处理负荷,提升了污水处理效率,维持出水的稳定达标。

复合成分的碳源营养剂更有助于提高微生物的整体性能,提升反硝化脱氮效率和系统工艺的整体处理效果。复合碳源营养剂的特殊性在于可以针对不同的水质和不同的现场处理工艺进行定制化的优化调整,既可以满足现场工艺需要,又具有极高的市场推广价值。随着环保政策及污水厂提标改造政策的进一步提高,对复合碳源营养剂提出了更高的要求,未来的发展方向必然是高效的、低成本、低 TN、低氨氮、低磷、低氯离子含量的、环保型的,同时具备靶向、微生物促进型等附加功能[13]的复合碳源营养剂将越来越受到市场的欢迎。

参考文献

- [1] 杨杰,白春学,胡梓璇.我国垃圾渗滤液处理现状及创业前景分析[J].辽宁化工,2021,50(4):499-501.
- [2] 尹文俊,周伟伟,王凯.垃圾渗滤液物化与生化处理工艺技术现状[J].环境工程,2018,36(2):83-86.
- [3] 丁丽强.垃圾渗滤液水质特性与处理技术分析[J].科学技术创新,2019(35):37.
- [4] 王声东.老港垃圾渗滤液应急项目污泥深度脱水工程实例[J].中国给水排水,2021,37(24):107-109.
- [5] 高景峰,吴桂霞,苏凯.处理垃圾渗滤液好氧颗粒污泥的培养及其脱氮特性[J].安全与环境学报,2015,15(5):244-248.
- [6] 王洪贞,李毅.不同外碳源对生物反硝化影响的研究[J].科学与技术工程,2013(13):1671-1815.
- [7] 杨敏,孙永利,郑兴灿.不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J].给水排水,2010,36(11):125-128.
- [8] 马勇,彭永臻,王淑莹.不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J].北京工业大学学报,2009,35(6):820-824.
- [9] 马娟,宋相蕊,李璐.碳源对反硝化过程 NO_2^- 积累及出水 pH 值的影响[J].中国环境科学,2014,34(10):2556-2561.
- [10] 王淑莹,侯红勋,许春生,等.以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J].北京工业大学学报,2009,35(11):1521-1526.
- [11] 徐亚同.不同碳源对生物反硝化的影响[J].环境科学,1993,15(2):40-45.
- [12] 周梦娟,缪恒锋,陆震明.碳源对反硝化细菌的反硝化速率和群落结构的影响[J].环境科学研究,2018,31(12):2047-2052.
- [13] 李金诗,赵坤强.不同碳源及含量对反硝化脱氮效果的影响研究现状[J].能源与环境,2011(3):6-10.