

# Research Status of Adding Carbon Sources to Domestic Wastewater with Low Carbon to Nitrogen Ratio

Qinyan Ren Leilei Fan\* Xiujun Yang Zhaorui Wang Xinru Hu

Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou, 563000, China

## Abstract

Due to the low-carbon source characteristics of domestic sewage in China, adding carbon sources is still a relatively expensive part of the sewage treatment process. Based on the sources of external carbon sources, we divide them into four categories: cellulose external carbon sources, industrial wastewater external carbon sources, household waste external carbon sources, and other carbon sources. Cellulose type carbon sources include sugarcane bagasse, corn cob, and straw; Common types of industrial wastewater with added carbon sources include beer wastewater, printing and dyeing wastewater, and juice production waste liquid; The added carbon sources for household waste include kitchen waste liquid, fruit and melon waste, and landfill leachate; Other carbon sources mainly include sludge hydrolysate, etc.

## Keywords

domestic sewage; external carbon sources; low-carbon sources

## 低碳氮比生活污水中外加碳源的研究现状

任琴艳 樊磊磊\* 杨秀军 汪召瑞 胡信茹

遵义师范学院, 中国·贵州遵义 563000

## 摘要

由于中国生活污水具有低碳源的特点,因此在污水处理过程中,外加碳源仍然是成本较高的一部分。根据外加碳源的来源,我们将外加碳源分为四类,分别是纤维素类外加碳源、工业废水类外加碳源、生活废弃物类外加碳源、其他碳源。纤维素类外加碳源包括甘蔗渣、玉米芯、秸秆;工业废水类外加碳源常见的有啤酒废水、印染废水、果汁生产废液;生活废弃物类外加碳源有餐厨垃圾废弃液、瓜果废弃物和垃圾渗滤液等;其他碳源主要还包括污泥水解液等。

## 关键词

生活污水;外加碳源;低碳源

## 1 引言

近年来,水体富营养化成为严重的环境问题,随着中国“水十条”的发布,对污水厂脱氮处理提出了更高的要求。污水的生物脱氮因其处理高效、价格低廉而被广泛使用,其主要过程是以污水中的氨氮在好氧条件下被硝化细菌和亚硝化细菌氧化成硝酸盐和亚硝酸盐,此后反硝化细菌在缺氧

条件下以小分子碳源为电子供体,亚硝酸盐为电子受体将硝酸盐还原成氮气从而实现污水中氮的去除。

而根据住建部的“全国城镇污水处理信息系统”表示,中国城镇郊区污水处理厂普遍存在碳氮比失调问题。在不外加碳源的情况下,很难保证出水总氮的达标排放。因此,通常情况下会额外投加碳源,以保证污水处理系统运行中脱氮过程的正常进行。论文将外加碳源主要分为四大类:天然纤维素类外加碳源、工业废水类外加碳源、生活废弃物类外加碳源、其他碳源,主要围绕这四类碳源展开论述。

**【基金项目】**大学生创新创业训练计划项目“基于酿酒废水资源化的低碳源生活污水处理技术研究”(项目编号:202210614022)。贵州省科技计划项目“小型分散式农村生活污水处理设备的研发”(黔科合支撑〔2024〕一般173)。

**【作者简介】**任琴艳(2000-),女,中国贵州人,本科,从事污水处理、环境微生物研究。

**【通讯作者】**樊磊磊(1983-),男,中国河南沁阳人,博士,副教授,从事污水、固体废弃物的资源化利用研究。

## 2 天然纤维素类外加碳源

天然纤维素类物质来源广泛、价格低廉可以有效减少污水处理成本,且天然纤维素类物质的生物质主要以一些植物生物质为主,如农业废弃物、植物凋落物、木材等物质。这些材料富含丰富的纤维素、半纤维素类、木质素类碳源,但通常这些大分子碳源不能被反硝化细菌利用,因此一般可通过机械粉碎、稀酸处理、稀碱处理、氧化处理、高压

蒸煮等预处理方法转化为小分子有机物。以农业废弃物为电子受体,目前研究者们研究了以甘蔗渣、玉米芯<sup>[1]</sup>、秸秆<sup>[2]</sup>等为反硝化的外加碳源来完成脱氮过程。

## 2.1 以甘蔗渣为电子受体

甘蔗是中国重要的糖料作物,中国南方是主要的甘蔗产区,年产量在7000多万吨。且甘蔗是中国最大的制糖原料,制糖后产生的甘蔗渣年产量在2000多万吨。甘蔗渣不仅是天然的高分子材料,且具有丰富的生物质能,甘蔗渣作为生物质具有收集集中、运输方便、成分相对简单等优势,因此可以作为很好的资源化原料。绍留<sup>[3]</sup>等人研究的以农业废弃物作为优选碳源中发现甘蔗渣浸出液中有有机碳含量和有机碳的释放速率明显高于其他农业材料。此外,陶生涛<sup>[4]</sup>以甘蔗渣为原料经过NaOH预处理后利用不同生物酶发酵生产丁二酸,由于丁二酸是小分子碳源,所以可以实现将甘蔗渣资源化后产生的丁二酸作为低碳源生活污水的外加碳源。刘云云<sup>[5]</sup>等人研究的以碱法预处理甘蔗渣中葡聚糖和木聚糖的转化率最高,在高浓底物补料同步糖化发酵过程中,在底物浓度为24% (w/v)的主发酵瓶内预酶解24h后乙醇的理论转化率可达74.13%。乙醇是处理生活污水过程中常用的外加碳源,因此甘蔗渣也可以经过预处理发酵后产生乙醇用作外加碳源。

## 2.2 以玉米芯为电子受体

玉米是中国三大主要农作物之一,产量巨大,玉米芯是将玉米粒剥除后残留的轴状物,目前中国处理玉米芯的主要方法是用作工业原料、食用菌基料、生物饲料或燃料,但唐婧<sup>[6]</sup>等人发现通过对棉花、稻草、稻壳、玉米芯作为外加碳源材料发现玉米芯不仅释碳稳定,且粗糙的表面有利于生物膜的附着,挂膜只需8~16天,因此既可以作为反硝化的碳源,又可以作为填料。邵留<sup>[3]</sup>等人对比各种农作物材料发现释碳量甘蔗渣>花生壳>玉米芯>稻草>稻壳>木屑,但甘蔗渣和花生壳供碳的持续力不足,不能够持续提供碳源,且通过脱氮实验表明玉米芯、稻草、稻壳的释碳持续能力长,作为反硝化碳源硝酸盐去除率可达80%。刘慧佳<sup>[7]</sup>通过正交实验确定了碱浓度为2%、处理时间12h、处理温度20℃的最佳碱改方式,发现在最佳碱改方式下玉米芯浸出液的C/N增大了200%。因此可以确定通过碱改后的玉米芯能够更好地用作外加碳源。

## 2.3 以秸秆为电子受体

农作物秸秆在中国农村地区广泛分布,主要是水稻秸秆、小麦秸秆和玉米秸秆。舒同<sup>[8]</sup>等人研究发现以小麦秸秆作为外加固体碳源可显著提高NO<sub>3</sub>-N的去除能力,曹文平<sup>[9]</sup>等发现酸性条件下更适合水稻秸秆释碳,且pH越低释碳越快越彻底,且水稻秸秆对硝态氮的去除效果较好几乎都在75%以上,王玥<sup>[10]</sup>等发现小麦秸秆的释碳量要大于水稻秸秆,但释碳持续力不佳,且有机碳的释放量低于水稻秸秆。由于玉米秸秆含有丰富的纤维素类物质,因此李同燕等<sup>[11]</sup>

经过研究发现NaOH可降解部分难降解的半纤维素木质素,且通过3%的NaOH处理后的水稻秸秆作为外加碳源时脱氮效率均大于90%。

## 3 工业废水类外加碳源

工业废水通常都是工业生产过程中产生的高浓度有机废水,常见的如啤酒废水、果汁生产废液、印染废水等这些废水通常可生化性高。如果将工业废水经过不同预处理方法(如厌氧处理、芬顿处理、臭氧处理或不处理等方法)处理后作为液体碳源投加进反硝化过程中,不仅可以降低污水处理的成本,还能将工业废水资源化利用,达到“以废治废”的目的,是一种潜在的、丰富的外加碳源。

### 3.1 以啤酒废水为电子受体

在啤酒酿造过程中大多由小麦、高粱、玉米等作为原料发酵,因此酿造废水中富含淀粉、还原糖、有机酸等大分子碳源,而酱香型酿酒废水中有机污染物与悬浮物含量均高于普通啤酒生产废水,所以,酿酒废水若以一般行业废水处理方式处理,很难达到预期处理效果,且直接处理排放会造成有机资源利用率低、处理成本高、污泥产量大等问题。刘方婧<sup>[12]</sup>研究发现啤酒废水的投加量(以COD计)为70mg/L时,此时生活污水中的COD、氨氮、总氮、总磷的去除率均较高,氨氮的去除率高达98.25%。陈柏成等<sup>[13]</sup>研究发现,与投加甲醇、葡萄糖相比投加啤酒废水可稳定提高脱氮效率,其中总磷去除最佳。谢甜<sup>[14]</sup>研究发现在一体式短程反硝化-厌氧氨氧化耦合脱氮系统中当进水中COD<sub>cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub>-N浓度分别为60mg/L、25mg/L、和35mg/L,且运行期间为30天时,不仅反硝化菌逐渐富集,系统中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率最高达95.4%。

### 3.2 以果汁生产废液为电子受体

果汁饮料产品主要原材料为水果、白糖等,果汁废水主要是来自冲洗水果、粉碎、榨汁等工序,罐装工段的洗瓶、灭菌、破瓶损耗和地面冲洗等环节。这类废水含有较高浓度的糖类、果胶、果渣、纤维素、果酸、单宁、矿物盐等。申世峰<sup>[15]</sup>等研究发现果汁废液有机物含量较高、可生化性较好、氮磷含量较低等优点,未经处理的果汁废液添加量为5%(体积分数)时,TN的去除率可提高5.79倍,由于果汁废液有机物浓度波动较大,且含有大量果渣所以可采用水解发酵进行预处理,预处理后的VFA平均提高率达到了57%。

### 3.3 以印染废水为电子受体

印染行业是“能耗水耗大户”,全国印染废水排放量约占整个工业废水排放量的35%,具有排水量大、污染物成分复杂、水质水量变化快等特点。陈宏来<sup>[16]</sup>研究发现投加印染废水为碳源时,在运行9个周期后TN浓度有所下降。熊秋元<sup>[17]</sup>等研究发现通过UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/草酸铁体系处理印染废水可提高印染废水的生化性,解决印染废水生化性低的问题,使其适于作为外加碳源。

## 4 生活废弃物类外加碳源

生活废弃物是人们在生活活动中产生的废弃物具有种类繁多、日常可见通常包含有机物,这些有机物可被微生物降解,提供碳源,促进一些生物过程,例如生物降解、反硝化等。常见的可以作为外加碳源的生活废弃物的有餐厨垃圾废弃液、瓜果废弃物和垃圾渗滤液等。利用生活废弃物作为外加碳源,可以将废弃物转化为有用的资源,减少对传统碳源的需求,减少废弃物的排放和提高资源的再利用率,有助于提高环境效益。

### 4.1 以餐厨垃圾废弃液为电子受

餐厨垃圾作为外加碳源的研究在环境科学和废弃物管理领域引起了广泛关注。厨余垃圾主要含有米、面、食用油、蔬菜果皮等有机物,直接处理不但会浪费资源还会消耗大量人力财力物力,通常将厨余垃圾经过水解酸化处理,这种做法旨在通过回收和再利用餐厨垃圾中的有机碳物质,为一些废水生物处理过程提供碳源,从而减少环境污染和促进资源的可持续利用。王攀<sup>[18]</sup>等研究发现以餐厨垃圾水解酸化液作为碳源合成聚羟基脂肪酸酯时,发酵时间越长发酵液中的 VFAs 浓度越高,当添加 120g 餐厨垃圾水解液时产生的 VFAs 质量浓度最高为 7839.76mg/L。张仲玲<sup>[19]</sup>研究发现当 pH 为 7 和 8.5 时,水解酸化效果最佳,对于从餐饮废弃物中提取的碳源,当 C/N 为 12 时,反硝化速率为 0.69mgN/mg VSS · d。通过研究对比以甲醇、乙酸、餐饮废弃物水解液作为废水处理中的碳源结果发现餐饮废弃物作为外加时运行成本最低。

### 4.2 以瓜果废弃物为电子受体

近年来由于产业结构的调整,水果和蔬菜集约化种植的迅猛发展,造成瓜果废弃物的大量产生和积累。对于瓜果废弃物我国常用的焚烧、填埋、好氧堆肥、厌氧发酵,但因为其含水率较高在实际工程中常常遇到许多困难,但其含碳量高的特点又使其成为一种可资源化的能源。将瓜果废弃物中的大分子物质(蛋白质、多糖、纤维素等)经过厌氧发酵后转化为小分子碳源<sup>[20]</sup>,将发酵液作为反硝化过程的电子供体,可有效利用瓜果废弃物,是遵循“双碳”理论的可持续方法,侯银萍<sup>[21]</sup>等分别研究发现在接种乳酸菌和厌氧污泥条件下,且不同接种比(F/M=0.5、1.0和1.5)的条件下,F/M=1.0和1.5时产物主要以非易于微生物利用的戊酸为主,而在以厌氧污泥发酵组的F/M=0.5时产物主要以乙酸为主。乙酸是我们常用的反硝化投加碳源,将含有乙酸的瓜果发酵液又与工业碳源乙酸钠进行对比,研究发现瓜果废弃物接种厌氧污泥,接种比为F/M=0.5中温发酵条件下,瓜果废弃物发酵液作为碳源具有更良好的性能,反硝化速率提高了31.4%。

### 4.3 以垃圾渗滤液为电子受体

垃圾渗滤液是由固体废弃物中的水分渗透而产生的液体,是一种有机物成分复杂、氨氮含量高、重金属离子浓度高等特征的污水,这些特征限制了生物法在渗滤液出力领域

的运用。但戴兰华<sup>[22]</sup>采用混凝/沉淀/过滤/吹脱联合工艺对垃圾渗滤液进行预处理,结果发现当预处理后的渗滤液与城市生活污水按1:200混合时,混合污水的COD/TN由2.4提高到3.7,表明预处理后的渗滤液具备了作为城市污水处理厂补充碳源的可能性。垃圾渗滤液中还含有高浓度可生物降解的有机物和VFAs,且新鲜垃圾渗滤液的COD可达70900mg/L,且垃圾渗滤液往往含有较高碱度,能稳定反硝化的pH值,提供良好的反应条件<sup>[23]</sup>。

## 5 其他碳源

除了天然纤维素类外加碳源、工业废水类外加碳源、生活废弃物类外加碳源外,剩余污泥水解后产生的水解液,因其可实现污泥资源化利用和亚硝酸无明显积累的特点也是目前作为外加碳源研究的重点,韩露等<sup>[24]</sup>人研究以污泥热水解液作为污水处理中的外加碳源,通过对SBR反应器脱氮效果的探究发现,未加入碳源时,反应器的脱氮效率只有47.83%,加入污泥水解液作为碳源后脱氮效率达到了81.30%,说明污泥水解液可以作为外加碳源。王开乐<sup>[25]</sup>探究了以碱解污泥上清液作为外加碳源的可行性,在单因素条件下,与葡萄糖和甲醇相比,碱解液作为碳源时,反应体系的反硝化速率分别提高了25.3%和23.7%,且确定了以污泥碱解液作为碳源时,SBR反应器进行反硝化时的最佳运行参数分别为C/N=5.5,初始pH=8,反应温度T=35℃,HRT=5h,此条件下NO<sub>3</sub>-N基本去除,NO<sub>2</sub>-N无积累,体系脱氮效果较为理想。

## 6 结论与展望

当前,用于污水处理厂的外加碳源种类繁多,许多种新型碳源在实际应用中的技术已经相对成熟,极大地降低了污水的成本。但目前的外加碳源仍然存在许多不足,比如像纤维素类外加碳源虽然价格低廉、来源广泛、运输方便,但预处理成本较高,且水力停留时间难控制。工业废水类作为外加碳源时,又会受废水个体差异的影响,且运输成本较高。生活废弃物类外加碳源有时又含有重金属、有毒微生物等,因此作为外加碳源时要先除去这些不利因素。Shi<sup>[26]</sup>等研究发现采用A/O/A SBR工艺后,当进水TN为52.7mg/L时,A/O/A SBR出水中TN可降至3.5mg/L。朱杰高<sup>[27]</sup>等人研究发现HDR自养型红菌可将亚硝酸盐直接转化成氮气,具有无需外加碳源、降低曝气量、污泥产量低等特点。未来我们在研究降低外加碳源的成本时,可以从开发更多新型碳源、研究新型工艺、发现更高效的反硝化功能类似菌种等方面。

### 参考文献

- [1] 唐婧,刘昱迪,孙凤海,等.以玉米芯为外加碳源的SBR脱氮特性[J].环境工程学报,2016,10(6):2775-2780.
- [2] 张永,王国强,康博远,等.秸秆发酵液碳源制备及污水反硝化脱氮研究[J].当代化工研究,2023(9):76-78.
- [3] 邵留,徐祖信,金伟,等.农业废物反硝化固体碳源的优选[J].中国

- 环境科学,2011,31(5):748-754.
- [4] 陶生涛.以甘蔗渣为原料发酵生产丁二酸的研究[D].无锡:江南大学,2015.
- [5] 刘云云.甘蔗渣乙醇高浓底物酶解发酵过程研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [6] 唐婧,刘昱迪,孙凤海,等.以玉米芯为外加碳源的SBBR脱氮特性[J].环境工程学报,2016,10(6):2775-2780.
- [7] 刘慧佳.以碱改玉米芯为碳源的人工湿地强化脱氮效果研究[D].长春:东北师范大学,2021.
- [8] 舒同.农业废弃物类碳源添加对低污染水氮素去除的影响及环境效应[D].镇江:江苏大学,2022.
- [9] 曹文平,张雁秋.稻草碳源释放特性及脱氮特征研究[J].节水灌溉,2014(4):39-41.
- [10] 王玥,秦帆,唐燕华,等.农业废弃物作为反硝化脱氮外加碳源的研究[J].林业工程学报,2019,4(5):146-151.
- [11] 李同燕,李文奇,胡伟武,等.以玉米秆为碳源原位修复地下水硝酸盐研究[J].水处理技术,2016,42(2):34-40.
- [12] 刘方婧.啤酒废水为外加碳源对A2/O工艺脱氮除磷的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [13] 陈柏成,马卓汝,唐美珍.外加碳源对SBR法处理生活污水的影响研究[J].绿色科技,2012(9):166-168+171.
- [14] 谢甜.基于啤酒废水为碳源的短程反硝化及其与厌氧氨氧化耦合脱氮研究[D].青岛:青岛科技大学,2023.
- [15] 申世峰,熊会斌,郭兴芳,等.果汁废液作为碳源强化生物脱氮效果的研究[J].工业水处理,2020,40(5):81-83+125.
- [16] 陈宏来.高浓度有机工业废水补充反硝化碳源的试验研究[J].工业用水与废水,2016,47(4):42-46.
- [17] 熊秋元,李春辉.UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/草酸铁体系处理针织印染废水的可生化性的探讨[J].轻纺工业与技术,2011,40(3):4-6+20.
- [18] 王攀,邱银权,陈锡腾,等.以餐厨垃圾水解酸化液为碳源合成PHA研究[J].环境工程,2018,36(6):145-149.
- [19] 张仲玲.反硝化脱氮外加碳源的选择[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [20] 李灿,方茜,魏春海,等.不同C/N下花生粕与果蔬皮联合厌氧发酵产酸效率研究[J].应用化工,2020,49(4):854-858.
- [21] 侯银萍,东王涛,张安龙,等.瓜果废弃物厌氧发酵产酸及发酵液作为反硝化外加碳源的研究[J].西安:陕西科技大学学报,2023,41(6):20-27.
- [22] 戴兰华.城市生活垃圾焚烧厂渗滤液资源化利用技术及展望[J].中国给水排水,2016,32(7):112-116.
- [23] 冯延申,黄天寅,刘锋,等.反硝化脱氮新型外加碳源研究进展[J].现代化工,2013,33(10):52-57.
- [24] 韩露,韩芸,代洋,等.污泥热水解滤液作污水反硝化碳源的脱氮性能[J].中国环境科学,2021,41(8):3653-3659.
- [25] 王开乐.剩余污泥作为反硝化外加碳源的制备及应用[D].大连:大连理工大学,2022.
- [26] Shi L, Ma B, Li X, et al. Advanced nitrogen removal without addition of external carbon source in an anaerobic/aerobic/anoxic sequencing batch reactor[J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2019(42): 1507-1515.
- [27] 朱杰高.HDR自养型红菌脱氮技术[Z].