

不同预处理玉米秸秆释碳特征及反硝化脱氮效果研究

赵燕景*, 王 晨, 孙子怡

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月17日

摘 要

为解决低C/N微污染水体反硝化碳源不足导致的脱氮效率低问题, 本研究以玉米秸秆为对象, 对比不同预处理对其释碳性能及反硝化效率的影响。首先利用扫描电镜对比观察预处理前后玉米秸秆表面结构变化, 同时通过静态释放实验, 探究不同预处理玉米秸秆的释碳性能及氮磷释放规律; 然后以不同预处理的玉米秸秆作为外加碳源, 考察了其脱氮能力及反硝化速率。结果表明: 不同处理后的植物材料表面粗糙程度由大到小依次为酸处理 > 碱处理 > 氧化处理; 静态释放实验中酸处理玉米秸秆碳量最大, 氮磷物质的释放量较低; 相较于其他预处理方式, 以酸处理玉米秸秆作为外加碳源的脱氮效果更好, 反硝化速率更高; 说明酸处理玉米秸秆是一种良好的低C/N微污染水体深度处理的反硝化碳源材料。

关键词

玉米秸秆, 预处理, 反硝化, 低C/N微污染水体

Characteristics of Carbon Release from Different Pretreated Corn Stover and the Effect of Denitrification on Nitrogen Removal

Yanjing Zhao*, Cheng Wang, Ziyi Sun

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

In order to solve the problem of low nitrogen removal efficiency caused by insufficient denitrification

*通讯作者。

文章引用: 赵燕景, 王晨, 孙子怡. 不同预处理玉米秸秆释碳特征及反硝化脱氮效果研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 498-506. DOI: 10.12677/aep.2025.154056

carbon sources in low C/N micropolluted water, this study took corn stover as the object and compared the effects of different pretreatment on its carbon release performance and denitrification efficiency. Firstly, scanning electron microscope was used to observe the changes in the surface structure of corn stover before and after pretreatment, and at the same time, static release experiments were carried out to investigate the carbon release performance and nitrogen and phosphorus release patterns of different pretreated corn stover; then, the nitrogen removal capacity and denitrification rate of different pretreated corn stover were investigated using the corn stover as an additional carbon source. The results showed that: the surface roughness of plant materials after different treatments was acid treatment > alkali treatment > oxidation treatment in descending order; the carbon release of acid-treated corn stover was the largest in the static release experiments, and the release of nitrogen and phosphorus substances was lower; compared with other pretreatment methods, acid-treated corn stover as an additional carbon source had better nitrogen removal effect and higher denitrification rate. The results indicated that acid treatment of corn straw was a good denitrification carbon source material for advanced treatment of low C/N micro-polluted water.

Keywords

Corn Stover, Pretreatment, Denitrification, Low C/N Micropolluted Waters

Copyright © 2025 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

微污染源中积累的氮化物是造成水体富营养化和生态毒性等环境问题的关键原因[1]。过量含氮污水及污染物的排放导致水体的 C/N 持续降低, C/N 反映了异养反硝化微生物对养分的需求[2]。在传统的微生物除氮工艺中, 如果缺乏充足的有机物质导致水体 C/N 过低, 将会影响系统对氮素的脱除率[3]。因此, 为避免水体富营养化的发生, 修复流域净化体系, 微污染水体的低 C/N 情况的改善显得尤为关键。

我国农作物秸秆资源庞大, 年均产量约为 9 亿吨, 具有来源广泛、取材方便、价格低廉等优点[4]。天然植物秸秆材料中富含木质纤维素, 经过适当预处理能够分解释放出糖类物质及少量微量元素。其中, 糖类物质可作为反硝化过程中的碳源, 而微量元素则有助于促进微生物的生长[5]。然而植物材料由于其结构易变形、有机物释放的不稳定和出水色度大等问题导致其在实际工程应用中受到限制。王玥等[6]以 6 种农业废弃物进行反硝化研究, 研究表明秸秆类材料浸出液具有高释碳水平和强持续供碳能力, 然而, 由于其表面含有较高浓度的可溶性有机碳和粗蛋白, 导致其可生化性相对较差, C/N 总体偏低, 因而难以直接作为高效反硝化外加碳源。因此, 深入研究植物材料预处理方式的选择显得尤为重要。

本研究以玉米秸秆为实验材料, 分别进行酸、碱和氧化预处理。随后, 通过静态释放实验, 系统比较和分析了不同预处理条件下玉米秸秆 COD、氮素和 TP 释放规律, 并观察不同预处理对其形貌特征的影响; 通过反硝化实验探讨了不同预处理玉米秸秆作为低 C/N 水库水体外加碳源的反硝化脱氮性能, 并筛选出了具有显著反硝化潜力的预处理方法。该研究成果为新型缓释碳源的开发与实际应用提供参考依据。

2. 材料和方法

2.1. 玉米秸秆扫描电镜观察

挑选均匀干燥、大小适中的玉米秸秆样品, 固定于样品台后进行喷金镀膜。在特定放大倍数下观察

并拍摄代表性区域，以分析碳源材料表面微观形貌。

2.2. 玉米秸秆的预处理

本研究选取的选用的玉米秸秆来自山东烟台某农村地区，将洗净后玉米秸秆在 50℃烘箱中烘干至恒重，随后剪成长 2~3 cm，宽 1~2 cm 的秸秆块并均分为 4 份；其中对照组不做任何处理，其余 3 份分别于 25℃条件下在 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液、0.5 mol/L 的 H₂SO₄ 溶液、0.5 mol/L 的 H₂O₂ 溶液中分别浸泡 24 小时。浸泡后，各份玉米秸秆均用蒸馏水反复清洗至 pH 呈中性，随后在 50℃烘箱中烘干至恒重，密封保存备用并分别标记为未处理、酸处理、碱处理和氧化处理。

2.3. 静态碳源释放实验

精确称量不同预处理的秸秆各 5 g (干重)，并称取等量未处理秸秆作为对照，分别放入 4 个 250 mL 锥形瓶中。各瓶加注蒸馏水至标线，采用封口膜密封瓶口，以隔绝空气干扰。将装置置于 25℃恒温装置中。实验周期为 30 d，每 2 d 于固定时段取适量的上清液，经 0.45 μm 滤膜过滤后测定滤液中 COD、TN、NO₃⁻-N 和 TP 的浓度变化，每次取样后更换锥形瓶中的蒸馏水。

2.4. 静态反硝化脱氮实验

取不同预处理后的玉米秸秆各 5 g，分别放置于如图 1 所示的试验装置中，并加入 250 mL 低 C/N 水库原水。整个实验装置置于 25℃恒温条件下。水库原水 NO₃⁻-N 浓度为 13 mg/L 左右，每 2 d 定期更换实验用水，将上清液通过 0.45 μm 滤膜过滤后对滤液的 COD、NO₃⁻-N 和 pH 等指标进行检测。

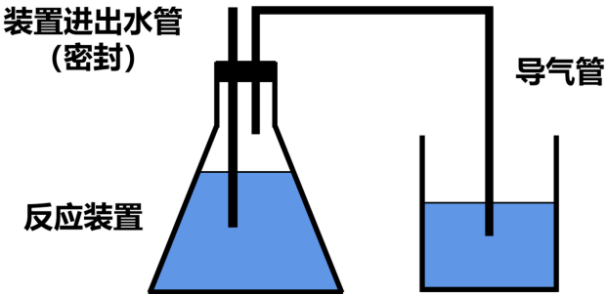


Figure 1. Diagram of static denitrification experimental setup
图 1. 静态反硝化实验装置图

2.5. 水样测试方法

本实验主要监测水质指标包括 COD、TN、TP、NO₃⁻-N 等，测定方法均参照《水和废水监测分析方法》[7]。

3. 结果

3.1. 玉米秸秆表面特征

表面粗糙度是影响微生物黏附和生长的重要特性，表面粗糙度好的生物膜载体可为微生物增殖提供良好的条件[8]。在反硝化过程中，植物材料既要向微生物提供有机质以促进其生长繁殖，还要作为载体实现微生物的聚集和固定，材料表面的粗糙程度与微生物附着的程度成正比，进而对脱氮效率产生显著影响，发挥着关键作用[9]。不同预处理前后玉米秸秆表面形态变化如图 2 所示，未处理的玉米秸秆表面具有众多致密的孔状结构，经氧化处理后，尽管孔状结构部分受损，但其表面粗糙度并未显著提升；相

比之下，酸处理和碱处理后的玉米秸秆表面出现了众多孔洞，导致比表面积显著增加，其中酸处理组表面粗糙度尤为突出。

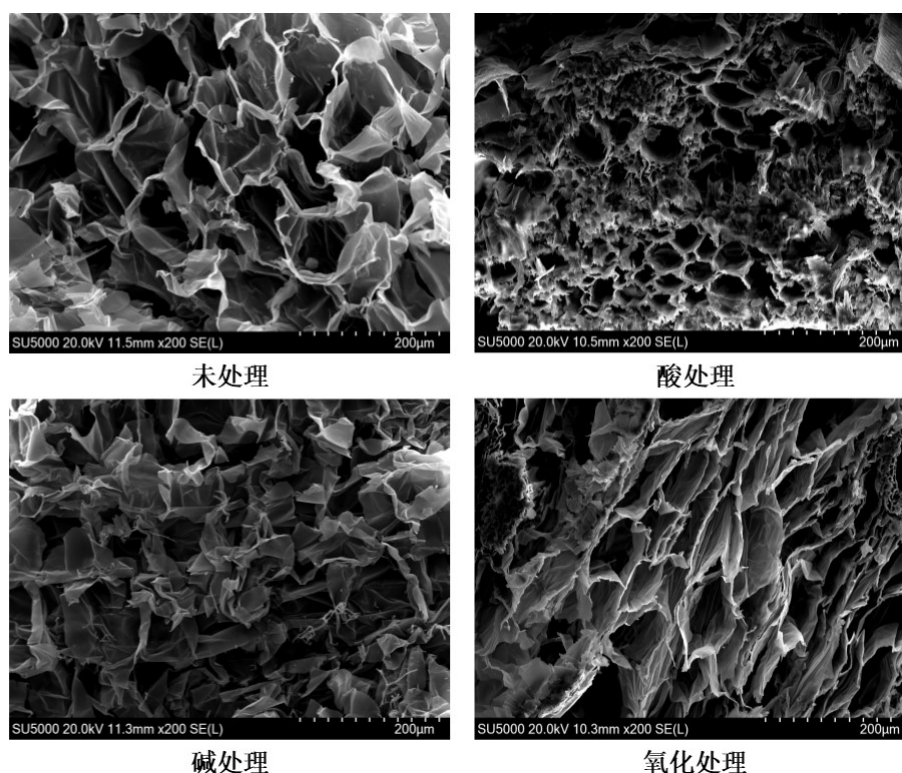


Figure 2. SEM surface characteristics of corn stover under different pretreatment conditions
图 2. 不同预处理条件下玉米秸秆的 SEM 表面特征

3.2. 不同预处理玉米秸秆静态释放规律

3.2.1. 不同预处理玉米秸秆的碳释放规律

植物材料预处理方式不同，其释放效率也会有所差异。酸处理在秸秆类生物质预处理领域的研究与应用最为广泛，其能有效溶解半纤维素，优化生物质孔隙结构，从而促进纤维素与酶的接触，提升酶解效率[10]。碱处理可有效断裂木质素中的酯键与芳基醚键，进而实现木质素的脱除[11]。氧化处理具备选择性针对羰基与乙烯基团进行攻击的特性，从而有效提升脱木质素的去除效率[12]。不同预处理后玉米秸秆的碳释放规律如图 3 所示，各预处理方式下的玉米秸秆碳释放规律趋于一致，表现为初期迅速释放，随后趋于稳定。四组玉米秸秆在第 1 d 释碳时的 COD 浓度均达到最大值，实验前 7 d，秸秆释放 COD 速率较快，这是由于释碳初期，秸秆表面附着的有机物大量溶出。当实验进行至 12 d 以后，秸秆浸出液的 COD 含量均低于 50 mg/L，此时释碳过程进入稳定阶段，秸秆中的纤维素和半纤维素缓慢分解，释碳含量逐渐降低。

3.2.2. 不同预处理玉米秸秆的氮释放规律

图 4 显示了玉米秸秆经不同预处理后 TN 和 NO_3^- -N 的释放规律，可以看出，相较于未处理，酸、碱和氧化预处理后玉米秸秆的 TN 和 NO_3^- -N 的释放量均有所降低。4 组玉米秸秆的 TN 的释放规律均为前期快后期慢，在 10 d 左右后保持在 5 mg/L 以下并保持稳定。在实验周期内，TN 释放总量由高到低依次为未处理 > 氧化处理 > 碱处理 > 酸处理，其主要原因 NO_3^- -N 释放规律与 TN 的释放规律相似，在实验初期

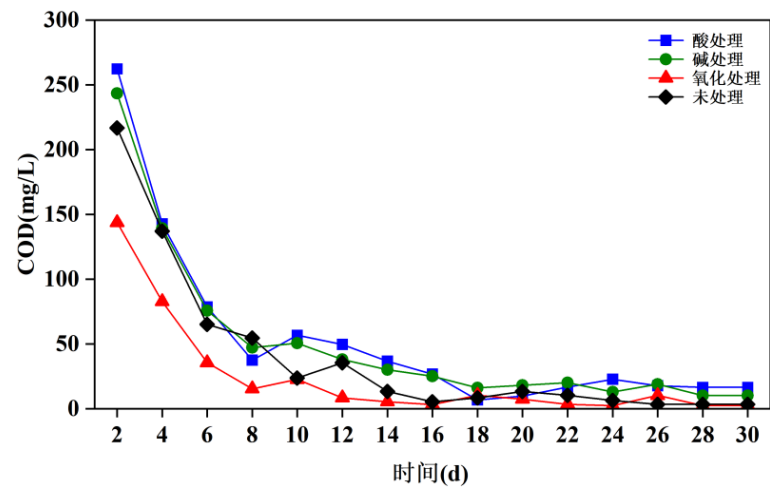


Figure 3. COD release from corn stover under different pretreatment conditions
图 3. 不同预处理条件下玉米秸秆 COD 释放情况

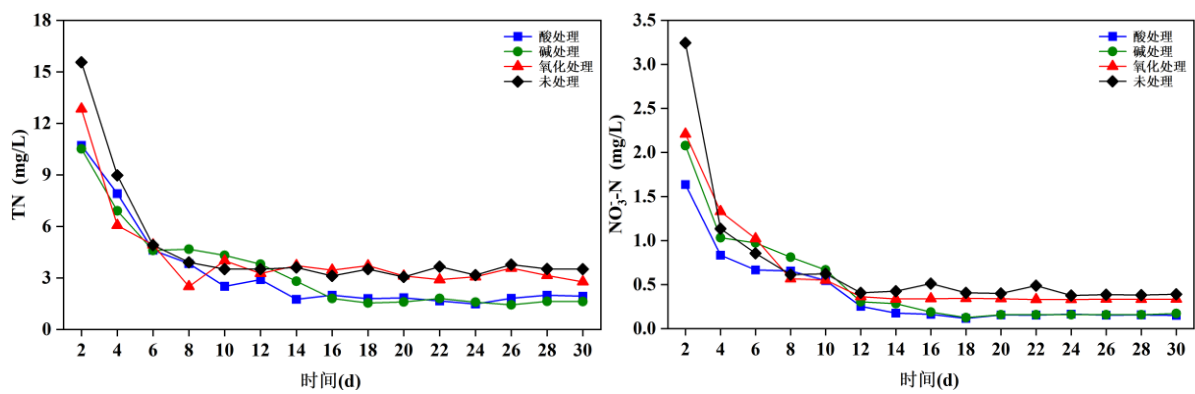


Figure 4. TN and $\text{NO}_3\text{-N}$ release from corn stover under different pretreatment conditions
图 4. 不同预处理条件下玉米秸秆 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 释放情况

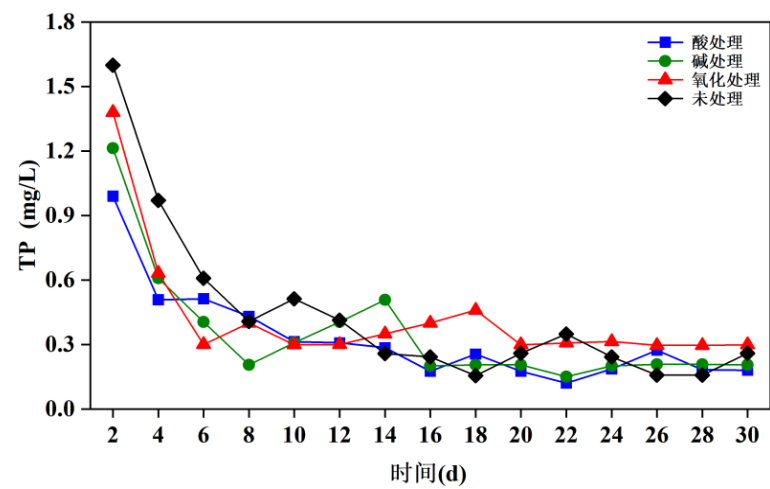


Figure 5. TP release from corn stover under different pretreatment conditions
图 5. 不同预处理条件下玉米秸秆 TP 释放情况

前 6 d 内不同预处理的玉米秸秆都有着较高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 释放量, 随后缓慢下降至 0.5 mg/L 左右并保持稳

定。实验第 1 d NO_3^- -N 释放量最小为酸处理 1.64 mg/L, 最大为未处理 3.36 mg/L; 实验后期, 所有处理组浸出液中 NO_3^- -N 浓度均维持在较低水平, 这表明玉米秸秆中的蛋白质的水解过程已基本完成。纵观整个试验过程, 未处理玉米秸秆的 NO_3^- -N 累积释放量最大, 浓度为 26.21 mg/L; 酸处理玉米秸秆的 NO_3^- -N 累积释放量最小, 浓度为 12.82 mg/L, 表明酸处理能够有效降低玉米秸秆中 NO_3^- -N 的释放。

3.2.3. 不同预处理玉米秸秆的磷释放规律

植物材料在作为微生物反硝化脱氮过程的外加碳源时, 会释放出一定量的磷化合物, 导致水体中磷含量上升, 进而可能引发富营养化现象。因此, 深入研究植物材料在水体中释放 TP 的规律显得尤为重要 [13]。不同预处理条件下玉米秸秆 TP 的释放规律如图 5 所示, 可以看出实验前期三种预处理后玉米秸秆的 TP 释放量相较于未处理均显著降低。前期释放量较高且表现出一定差异, 从第 6 d 开始趋于稳定, 到第 8 d 时释放量均低于 0.6 mg/L。在整个实验过程中酸处理玉米秸秆的 TP 释放总量最小, 为 4.89 mg/L, 表明酸处理对水体的潜在二次污染风险最小。

3.3. 不同预处理玉米秸秆脱氮效果分析

以酸处理、碱处理、氧化处理和未处理的玉米秸秆作为反硝化外加碳源进行了反硝化脱氮实验, 连续测定 30 d 的出水水质, 从出水 COD 浓度和 NO_3^- -N 去除率, 综合分析四种预处理玉米秸秆作为碳源被利用的难易程度和脱氮效率, 优选出最适合低 C/N 微污染水体的反硝化碳源。

3.3.1. 不同预处理玉米秸秆反硝化过程的碳变化规律

图 6 为出水 COD 变化情况, 从图中可以看出, 在实验的前 6 d 中, 4 组玉米秸秆的反硝化出水 COD 迅速下降。在后续实验中, 酸处理和碱处理玉米秸秆的反硝化出水 COD 明显高于氧化处理和未处理, 能够为反硝化过程提供更多碳源。酸处理、碱处理、氧化处理和未处理玉米秸秆 30 d 反硝化平均出水 COD 分别为 43.07 mg/L、42.10 mg/L、29.32 mg/L 和 23.99 mg/L, 可见酸处理玉米秸秆具有更好的反硝化潜力。

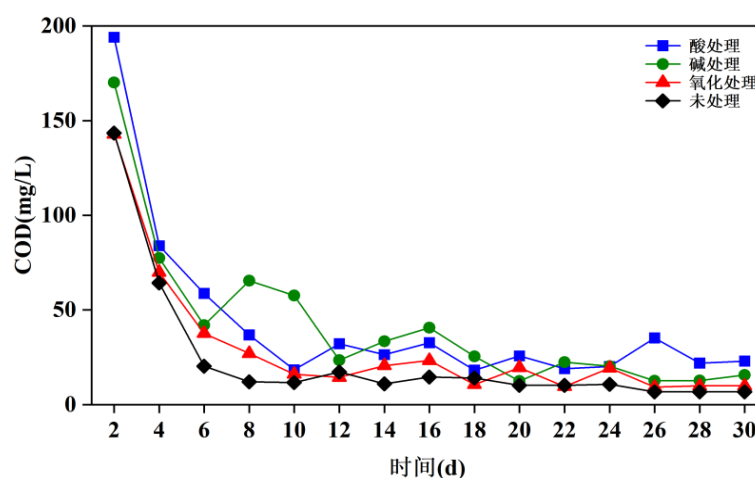


Figure 6. COD content of corn stover denitrification effluent under different pretreatment conditions

图 6. 不同预处理条件下玉米秸秆反硝化出水 COD 含量

3.3.2. 不同预处理玉米秸秆反硝化过程中硝酸盐去除率的变化规律

从图 7 可以看出, 实验初期四组玉米秸秆的 NO_3^- -N 去除率均较高且稳定, 这主要归因于前期玉米秸秆释放了大量有机物, 使得微生物可以充分利用水体中的可溶性碳进行生长、繁殖及反硝化作用, 将 NO_3^- -N 转化为 N_2 排放到空气中去, 降低水体中的氮浓度 [14]。经酸、碱及氧化预处理后的玉米秸秆, 其

NO_3^- -N 平均去除率均高于未处理对照组, 实验前 6 d 酸处理和碱处理玉米秸秆 NO_3^- -N 去除率保持在 90% 左右, 氧化处理和未处理玉米秸秆 NO_3^- -N 去除率保持在 80% 左右。随着玉米秸秆 COD 的释放趋于稳定, NO_3^- -N 去除率也逐渐降低。整体来看, 酸处理玉米秸秆在实验周期中一直保持着较高的 NO_3^- -N 去除率。

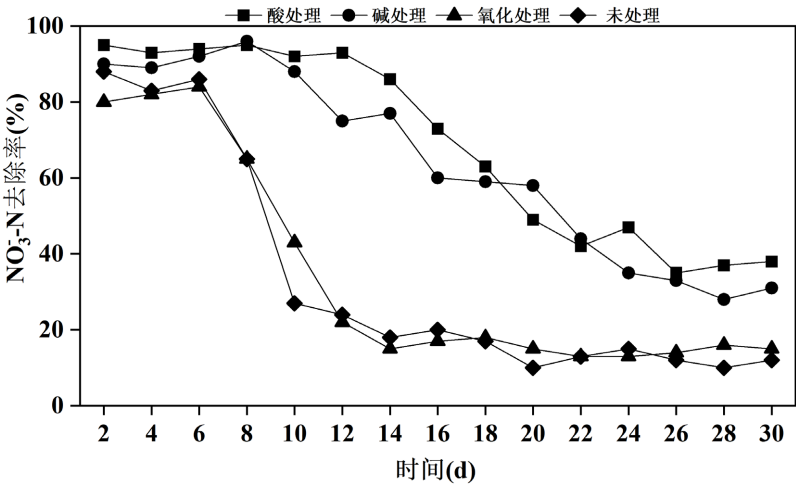


Figure 7. NO_3^- -N content and NO_3^- -N removal rate of corn stover denitrification effluent under different pretreatment conditions

图 7. 不同预处理条件下玉米秸秆反硝化出水 NO_3^- -N 含量和 NO_3^- -N 去除率

3.3.3. 不同预处理玉米秸秆反硝化速率分析

反硝化速率是衡量反硝化作用的一项重要指标, 反映了硝酸盐转化为氮气或其他氮氧化物的速度, 是氮循环的重要组成部分[15]。高反硝化速率通常意味着生态系统能够有效去除水体或土壤中的过量 NO_3^- -N, 减少环境污染[16]。研究根据 NO_x^- -N (NO_3^- -N + 0.6 NO_2^- -N) 的变化, 计算系统的反硝化速率(VDN), 其结果如表 1 所示。

Table 1. Denitrification rate of straw under different pretreatment conditions
表 1. 不同预处理条件下的秸秆反硝化速率

预处理方式	反硝化速率 mg/(L·h)
酸处理	0.52
碱处理	0.47
氧化处理	0.37
未处理	0.22

可以看出添加经过酸、碱和氧化处理后的玉米秸秆相较于未处理玉米秸秆的反硝化速率有显著提高。实验数据显示酸处理玉米秸秆的系统反硝化速率为 0.52 mg/(L·h), 较未处理对照组提升 0.30 mg/(L·h), 优于碱处理和氧化处理。

4. 讨论

4.1. 不同预处理玉米秸秆静态释放特征

从不同预处理前后玉米秸秆表面特征图可以看出酸处理和碱处理对玉米秸秆表面的破坏程度最为严重, 且酸处理引发的孔洞数量最多, 其原因主要是因为酸处理通过化学分解作用降解木质素和半纤维素、

部分解聚纤维素,物理侵蚀作用腐蚀表面并形成孔洞,松散细胞壁结构,以及水分渗透膨胀和酸催化效应,共同导致玉米秸秆比表面积显著增加,暴露更多纤维结构,有利于细菌附着和生长[17]。不同预处理的玉米秸秆在实验前期 COD 的释放量较为不稳定,酸处理的释碳量高于其他处理且秸秆初始碳释放浓度较高,这是因为酸处理可以迅速液化秸秆中的木质素,破坏其复杂的酚类聚合物结构,使木质素更容易释放,降低半纤维素含量[18];同时,酸还降解半纤维素,降低其含量,直接增加碳的释放并暴露更多可降解成分,导致初始碳释放浓度高。Pi S 等[19]用 0.1 mg/L 稀硫酸、氢氧化钠分别处理稻草和稻壳,研究发现酸处理稻壳和稻草的有机物释放率均高于碱处理和未处理,这与本研究是一致的。通过对比酸、碱和氧化处理后玉米秸秆释碳量的大小可以得出酸处理后玉米秸秆释碳量更多,释碳性能更佳。相较于碱处理和氧化处理,玉米秸秆经酸处理后其氮素和 TP 的释放量相对较低,这主要是因为经酸处理后玉米秸秆的理化性质发生了改变,硝化纤维素分解为可溶性糖类,降解半纤维素为单糖和低聚糖,同时改性木质素,降低其与氮素和磷化物的结合能力[20]。此外,酸处理破坏秸秆细胞壁结构,增加物质流动性,并降低 pH 值,改变氮素和磷化物的存在形态,进一步促进其溶出[21]。

4.2. 不同预处理玉米秸秆对反硝化性能的影响

NO_3^- -N 的脱除率往往与生物膜有关,生物膜是细菌依附碳源表面进行大量生长繁殖所形成的复杂结构,其形成过程受碳源的可生化性、有机物含量和表面粗糙程度等因素影响[18]。酸处理后的玉米秸秆,由于其更高的表面粗糙度和优异的可生化性,为微生物的附着和生物膜的形成提供了更多附着位点和优质碳源。在静态反硝化实验中,这些特性有效促进了生物膜的形成,丰富了可溶性碳源,为反硝化细菌提供了充足的能量和电子供体,加速了反硝化过程;同时,生物膜的保护作用和微生物间的协同作用进一步提高了脱氮效率[22]。吴丹等[23]采用 H_2SO_4 处理腐朽木进行反硝化脱氮试验,在 HRT 为 2 h 条件下平均反硝化速率最高可达 $21.86 \text{ NO}_3^- \text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。上述结果说明酸处理通过有效改变植物材料木质素的结构,表现出较好的碳源可持续利用能力,延长了系统反硝化作用的持续时间,具备良好的脱氮性能及反硝化稳定性。

5. 结论

不同预处理方式对植物材料的物化性质的影响不同。玉米秸秆经不同预处理后的表面形貌与纤维结构均遭到一定程度的破坏,其中经酸处理后玉米秸秆表面粗糙度最大,更有利于微生物的附着生长。在实验初期,酸处理的玉米秸秆释放了相对较多的有机碳源,并且后期也能稳定在 17 mg/L 左右,同时氮磷物质的释放量较低,符合外加碳源高有机物低污染物的要求。

在静态反硝化脱氮实验中,相较于其他预处理方式,酸处理的玉米秸秆在运行 30 d 中 NO_3^- -N 的平均去除率最高并且出水 COD 浓度能够维持在较低水平。各种预处理方式均提升了玉米秸秆的反硝化速率,其中酸处理玉米秸秆的系统反硝化速率较未处理提升最多。因此优选酸处理玉米秸秆作为低 C/N 比水库原水的反硝化碳源。

参考文献

- [1] 王宇娜,国晓春,卢少勇,等.人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展:效果、机制和影响因素[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):722-734.
- [2] 陈川,张雨,张权,等.基于硫源介导的低碳脱氮技术研究进展[J].环境科学研究,2023,36(12):2221-2234.
- [3] 废物处理与综合利用[J].环境科学文摘,2000(2):44-81.
- [4] 张晓庆,王梓凡,参木友,等.中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J].中国农业大学学报,2021,26(9):30-41.

- [5] 杨玉婷, 何小娟, 苏跃龙, 等. 外加植物碳源强化人工湿地脱氮的研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(5): 1-4, 10.
- [6] 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.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 10-20.
- [8] 黄祥威, 李鑫静, 黄琼柔, 等. 6种常见湿地植物生物质用作污水反硝化碳源的脱氮效果及出水残留有机组分[J]. 环境工程学报, 2024, 18(8): 2109-2120.
- [9] 周鹏, 刘鹰, 苏鑫, 等. 可生物降解聚合物作为固相反硝化碳源的研究进展[J]. 环境化学, 2024, 43(6): 2047-2057.
- [10] 王圆圆, 韩秀丽, 阎振丽, 等. 秸秆类生物质预处理技术的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(11): 1-10.
- [11] Mohammad Rahmani, A., Gahlot, P., Moustakas, K., Kazmi, A.A., Shekhar Prasad Ojha, C. and Tyagi, V.K. (2022) Pretreatment Methods to Enhance Solubilization and Anaerobic Biodegradability of Lignocellulosic Biomass (Wheat Straw): Progress and Challenges. *Fuel*, **319**, Article 123726. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123726>
- [12] Kumar, A.K. and Sharma, S. (2017) Recent Updates on Different Methods of Pretreatment of Lignocellulosic Feedstocks: A Review. *Bioresources and Bioprocessing*, **4**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
- [13] 黄祥威, 李鑫静, 黄琼柔, 等. 6种常见湿地植物生物质用作污水反硝化碳源的脱氮效果及出水残留有机组分[J]. 环境工程学报, 2024, 18(8): 2109-2120.
- [14] 薛同站, 全志道, 李卫华, 等. 短程反硝化强化脱氮的影响因素及其耦合工艺应用进展[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 663-671.
- [15] 周姣, 李金城, 韦春满, 等. 深床反硝化生物滤池处理二级生化尾水试验[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(1): 224-231.
- [16] 庞家平, 李恒鹏, 李俊, 等. 木片反硝化生物反应器对农业面源污水氮去除的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(11): 1463-1472.
- [17] 常娟, 卢敏, 尹清强, 等. 秸秆资源预处理研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 1-8.
- [18] 陈俊玲, 王莎莎, 张晓杰, 等. 农田管理对土壤中木质素积累与转化影响的研究进展[J]. 江西农业学报, 2024, 36(12): 58-64.
- [19] Pi, S., Sun, J., Feng, L. and Zhou, J. (2020) Performance and Microbial Diversity of Denitrifying Biofilms on Polyurethane Foam Coupled with Various Solid Carbon Sources for Nitrate-Rich Water Purification. *International Microbiology*, **23**, 405-413. <https://doi.org/10.1007/s10123-019-00114-z>
- [20] 武威, 马秋刚, 朱选, 等. 蒸汽爆破对木质纤维素高值化利用的研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(5): 23-37.
- [21] 吴义强. 木材科学与技术研究新进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 1-28.
- [22] 薛同站, 全志道, 李卫华, 等. 短程反硝化强化脱氮的影响因素及其耦合工艺应用进展[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 663-671.
- [23] 吴丹, 胡细全, 刘刚. 酸预处理腐朽木脱氮性能研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(10): 16-22.