



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201951 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

徐晨璐, 尹志轩, 李春雨, 等. 垃圾渗滤液补充反硝化碳源强化脱氮效果 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1106-1112.

XU Chenlu, YIN Zhixuan, LI Chunyu, et al. Nitrogen removal enhancement with landfill leachate as supplemental carbon source for denitrification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(5): 1106-1112.

垃圾渗滤液补充反硝化碳源强化脱氮效果

徐晨璐¹, 尹志轩^{1,*}, 李春雨¹, 毕学军¹, 顾瑞环²

1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033

2. 青岛首创瑞海水务有限公司, 青岛 266042

第一作者: 徐晨璐(1995—), 女, 硕士研究生。研究方向: 污水处理与资源化。E-mail: chluxe@163.com

*通信作者: 尹志轩(1988—), 女, 博士, 讲师。研究方向: 污水生物处理与资源化。E-mail: yzxqut@163.com

摘要 垃圾渗滤液中含有大量易被微生物利用的挥发性脂肪酸, 若其可以作为城镇污水处理厂的补充碳源, 将对降低碳源投加成本和实现垃圾渗滤液资源化利用有重要意义。在实际城镇污水处理厂考察了垃圾渗滤液补充进水碳源的脱氮效果, 并进一步对比了传统碳源(甲醇、乙酸钠)、垃圾渗滤液及垃圾渗滤液在不同pH条件下产生的水解酸化液作为碳源时的反硝化效果。结果表明, 实际城镇污水处理厂投加乙酸钠作为补充碳源时总氮去除率仅提高3%左右, 而在进水中混合垃圾渗滤液后提高了约10%。垃圾渗滤液与乙酸钠作碳源时 NO_3^- -N去除率均>97%, 但垃圾渗滤液为碳源时最大比反硝化速率高达 $8.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以MLSS计), 是乙酸钠为碳源时的1.7倍; 垃圾渗滤液中性和碱性水解酸化液为碳源时, 反硝化效果相差不大, 最大比反硝化速率为 $4.5 \sim 4.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以MLSS计), NO_3^- -N去除率仅为70%左右。垃圾渗滤液或其水解酸化液是否可以作为强化脱氮效果的补充碳源取决于基质本身的性质。

关键词 垃圾渗滤液资源化; 外加脱氮碳源; 反硝化; 水解酸化

近年来, 垃圾渗滤液的处理一直是国内外学者的研究热点^[1-2]。当垃圾渗滤液处理设施不完善时, 通常将垃圾渗滤液与市政污水共同处理^[3-4]。而研究者在前期的实际工程运行过程中发现, 新鲜垃圾渗滤液中含有大量易被生物利用的挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)^[5], 渗滤液与市政污水混合后, 城镇污水处理厂总氮(total nitrogen, TN)去除率明显提高, 且出水TN可达国家一级A类标准^[6]。因此, 垃圾渗滤液可能具有补充碳源的作用^[7]。然而, 现有的研究较少关注新鲜垃圾渗滤液作为脱氮碳源的作用, 缺乏垃圾渗滤液和传统碳源的对比研究。鉴于此, 本研究在城镇污水处理厂实际运行过程中考察了垃圾渗滤液补充进水碳源的脱氮效果, 并进一步对比了传统碳源(甲醇、乙酸钠)、垃圾渗滤液及其在不同pH条件下产生的水解酸化液作为碳源时的反硝化效果。该研究可为污水处理厂选择优质高效的碳源提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实际工程脱氮效果监测

实验在青岛某城镇污水处理厂进行, 市政污水进水流量为 $1.7 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 进水水质如表1所示。该

收稿日期: 2018-08-12; 录用日期: 2019-01-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101-002); 国家国际科技合作专项项目(2016YFE0123500-003)

污水处理厂所接纳的污水中30%~50%为工业废水,以高含氮素的化工、造纸、棉纺印染废水为主,从而导致进水 BOD_5/TN 较低。为去除污水中的氮素,污水厂采用改良 A^2/O 脱氮除磷工艺^[8],24 h取样器取污水处理厂进出水混合样进行水质指标测试。

表1 污水处理厂进水水质

mg·L ⁻¹			
BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN
387.1±39.1	984.9±36.9	46.4±11.5	79.1±20.1

监测共分为无外加碳源、外加乙酸钠作为补充碳源和垃圾渗滤液补充进水碳源3个阶段。其中,乙酸钠投加于前置及后置反硝化池,总投加量为145 mg·L⁻¹进水;而垃圾渗滤液作为补充碳源时则与市政污水在进水中混合,其补充量为300~400 t·d⁻¹。

本研究中的垃圾渗滤液属于新鲜垃圾渗滤液,取自青岛某垃圾填埋场,填埋垃圾以生活垃圾为主,故渗滤液中含有大量的易生物降解的有机物。其中,溶解性化学需氧量(SCOD)和挥发性脂肪酸(VFAs)的浓度分别为15 000~20 000 mg·L⁻¹和6 300~6 500 mg·L⁻¹(以COD计);NH₄⁺-N和TN浓度分别为1 200~1 400 mg·L⁻¹和1 500~2 000 mg·L⁻¹。

1.2 反硝化批次实验

为了进一步对比不同类型碳源对反硝化过程的影响,分别以传统碳源(甲醇、乙酸钠)、垃圾渗滤液、垃圾渗滤液的水解酸化液作为基质进行反硝化批次实验。为研究垃圾渗滤液在中性和碱性条件下产生的水解酸化液作为反硝化碳源的效果,垃圾渗滤液的水解酸化液为垃圾渗滤液分别在pH为8和11的条件下经过3 d中温(35 ℃)水解酸化后的上清液^[9]。反硝化批次实验在有效容积为2 L的序批式反应器(SBR)中进行。实验废水为人工配水,即在自来水中加入一定量NO₃⁻-N母液和外加碳源,使反硝化过程的NO₃⁻-N初始浓度为50 mg·L⁻¹、COD初始浓度为300 mg·L⁻¹,使得反硝化过程开始时的COD/NO₃⁻-N为6,以保证充足的反硝化碳源^[10]。接种污泥为青岛市某城镇污水处理厂回流污泥,其混合液悬浮固体(MLSS)平均浓度为6 806.7 mg·L⁻¹,接种污泥未经甲醇驯化。控制反硝化过程初始pH为7.0±0.2,溶解氧(DO)浓度<0.5 mg·L⁻¹。间隔时间取样进行水质指标测试。每个条件下的反硝化批次实验均进行3次平行实验,取实验数据平均值进行分析讨论。

1.3 水质分析测试方法

常规水质指标如BOD₅、SCOD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、SS的测定采用文献中的方法^[11];VFAs的测定采用气相色谱(GC-FID, Agilent7820A),配有氢火焰离子检测器,北京中惠普SPH-300A氢气发生器,氮气作为载气。

2 结果与讨论

2.1 实际工程不同碳源反硝化效果比较

图1为向实际污水处理厂投加不同碳源时进出水TN浓度以及去除率的变化趋势。由于初沉池截留了大部分的碳源,导致生物处理系统进水 BOD_5/TN 仅为4左右,碳源不足难以满足脱氮需求。从图1中可以看出,各反应阶段的进水TN波动较大,但出水TN较为稳定。在未投加碳源时,污水处理厂进水有机负荷和TN负荷分别为2.04 kg·(m³·d)⁻¹(以COD计)和0.16 kg·(m³·d)⁻¹,出水TN平均浓度为25.6 mg·L⁻¹;而在生物处理工艺中投加乙酸钠作为单一碳源后,TN平均去除率由69.4%提高至72.1%,出水TN浓度仅稍有下降(平均浓度为21.2 mg·L⁻¹),未能达到国家一级A类标准(GB 18918-2002)。这可能是由于其其他异养菌和反硝化菌对底物乙酸钠的竞争性利用,导致在以乙酸钠为外加碳源的情况下,乙酸钠被非反硝化功能的聚磷菌和普通异养菌消耗^[12],造成了乙酸钠的浪费,TN去除效果也没有得到明显的改善。但在投加乙酸钠的基础上进一步向市政污水进水中混合了垃圾渗滤液后,有机负荷提高到2.49 kg·(m³·d)⁻¹(以COD计),而TN负荷并没有显著增加(进水TN负荷为0.17 kg·(m³·d)⁻¹),TN平均去除率却提高了10%左右,出水TN平均浓度下降至12.4 mg·L⁻¹,满足国家一级A类标准。袁敏等^[13]在以垃圾渗滤液作为市政污水脱氮工艺补充碳源时发现,与未投加垃圾渗滤液相比,当垃圾渗滤液的投

加量为0.4%时, A²/O工艺的进水有机负荷由1.63 kg·(m³·d)⁻¹(以COD计)提高至1.92 kg·(m³·d)⁻¹(以COD计); TN负荷由0.13 kg·(m³·d)⁻¹提高到0.14 kg·(m³·d)⁻¹; TN去除率达到了68.6%, 提高了20.2%, 与本研究的发现一致。在本研究中, 进水中混合垃圾渗滤液后污水的BOD₅/TN从4.4提高至5.1, 为反硝化脱氮工艺提供了更多的碳源, 因而脱氮效率得到了提高; 且与投加乙酸钠为单一碳源相比, 垃圾渗滤液作为复杂基质, 其中包含了更为丰富的有机碳源, 有利于各种脱氮菌群的利用^[14-15]。虽然垃圾渗滤液中含有大量的NH₄⁺-N^[16-17], 但相比于市政污水总量来说, 300 t·d⁻¹的投加量对NH₄⁺-N浓度增加的贡献仅有2.37 mg·L⁻¹, 且投加垃圾渗滤液后污水厂出水NH₄⁺-N仍维持在0.8 mg·L⁻¹左右, 这说明垃圾渗滤液中的高氨氮浓度对市政污水脱氮效果无显著影响; 同样地, 垃圾渗滤液中含有的难降解有机物也被污水厂进水稀释, 与市政污水混合处理后出水COD仅为25 mg·L⁻¹左右, 且在长期运行过程中也未发现污泥中毒现象。综上可见, 在实际污水处理厂中投加适量的垃圾渗滤液不仅可以实现以废治废的目的, 还可以提高脱氮效果, 解决原水碳源不足的问题。

2.2 传统碳源及垃圾渗滤液作为碳源时的反硝化效果比较

图2展示了传统碳源(甲醇、乙酸钠)和垃圾渗滤液作为碳源时反硝化过程中NO₃⁻-N和NO₂⁻-N浓度的变化情况。如图2(a)所示, 在相同COD/NO₃⁻-N的条件下, 乙酸钠与垃圾渗滤液作为碳源时, 均获得了较为显著的NO₃⁻-N去除效果, 在4 h的实验时间内, NO₃⁻-N几乎被完全去除(去除率>97%)。与传统碳源(甲醇、乙酸钠)相比, 垃圾渗滤液作碳源时的最大比反硝化速率更高(约为8.8 mg·(g·h)⁻¹(以MLSS计)), 从而使得1 h内NO₃⁻-N去除率达到90%以上; 同时, NO₂⁻-N在反应开始的1 h内发生了积累, 最高积累量为12.3 mg·L⁻¹, 但在随后的2 h内, NO₂⁻-N逐渐被消耗(图2(b))。垃圾渗滤液中含有大量易生物降解的COD, 使其作为碳源时具有较高的反硝化速率; 特别是填埋龄<5年的新鲜垃圾渗滤液的COD一般超过10 g·L⁻¹, 且具有较高的BOD₅/COD、VFA/TOC>70%, 可生化性较好^[18]。而以易被微生物利用的乙酸钠作碳源时, NO₃⁻-N在前2 h内达到了97.0%的去除率; 且在最初的1 h内, NO₂⁻-N发生了积累, 最大积累量为15.1 mg·L⁻¹。NO₂⁻-N的积累是由于NO₂⁻-N还原速率小于NO₃⁻-N还原速率造成的, 这是因为NO₂⁻-N的质子化产物游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)对NO₃⁻-N还原过程产生了抑制作用, 导致此后的比反硝化速率从6.1 mg·(g·h)⁻¹(以MLSS计)下降至3.5 mg·(g·h)⁻¹(以MLSS计)。据SOTO等^[19]报道, NO₃⁻-N与NO₂⁻-N相互抑制其还原过程; 而马娟等^[20]研究发现, NO₂⁻-N含量越高, NO₃⁻-N还原过程受抑制的情况越明显, 且FNA才是抑制NO₃⁻-N还原的真正因素, 而NO₂⁻-N还原过程受NO₃⁻-N的抑制影响较小。与垃圾渗滤液相比, 在4 h的反应时间结束时, 乙酸钠作为碳源最终仍有6.4 mg·L⁻¹的NO₂⁻-N积累量。与乙酸钠和垃圾渗滤液作为碳源相比, 甲醇的反硝化效果并不理想, 在最初的1 h内反硝化反应缓慢, NO₃⁻-N在1 h后才得到了明显去除, 且最大比反硝化速率仅为3.6 mg·(g·h)⁻¹(以MLSS计), 在4 h后NO₃⁻-N去除率仅达到了71.3%; 此外, NO₂⁻-N在4 h的实验期间内逐渐累积, 最终积累量为8.5 mg·L⁻¹。马勇等^[21]研究发现, 甲醇作为外碳源时系统启动时间和驯化期长, 不能迅速地响应进水水质的变化, 且其具有毒性, 反硝化效率低。而当甲醇作为碳源时NO₂⁻-N的持续积累对反硝化过程有强烈的抑制作用, 从而导致NO₃⁻-N去除效果相对较差。综上所述, 与传统碳源(甲醇、乙酸钠)相比, 垃圾渗滤液

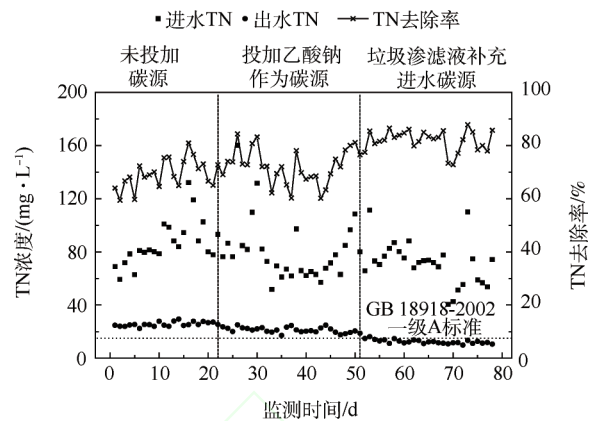


图1 青岛某城镇污水处理厂投加乙酸钠和垃圾渗滤液作为碳源时TN的去除效果

Fig. 1 TN removal performance with/without sodium acetate and landfill leachate as carbon sources in actual municipal wastewater treatment plant in Qingdao, China

具有更快的反硝化速率和更高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率,可作为污水处理厂的补充碳源。

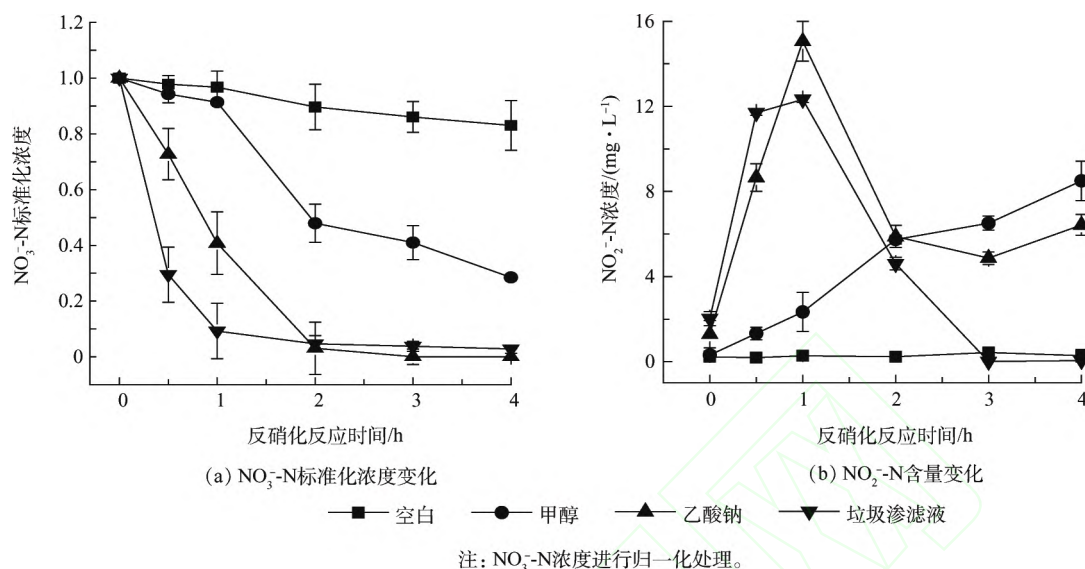


图2 传统碳源(甲醇、乙酸钠)及垃圾渗滤液为反硝化碳源时 $\text{NO}_3\text{-N}$ 标准化浓度和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量变化

Fig. 2 Variations in the normalized nitrate concentrations and nitrite concentrations with traditional carbon sources (methanol or sodium acetate) or landfill leachate as carbon source for denitrification

2.3 垃圾渗滤液水解酸化液作为碳源时的反硝化效果

垃圾渗滤液水解酸化液为碳源时反硝化过程中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的变化情况见图3。从图3(a)可以看出,当以垃圾渗滤液在 $\text{pH}=8$ 和 $\text{pH}=11$ 条件下产生的水解酸化液作为碳源时, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的比反硝化速率在反应阶段开始的30 min内差别不大(约为 $4.5\sim 4.8\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以MLSS计));在随后的反应时间内,两者的反硝化速率均减缓,然而相比之下,碱性水解酸化液作为碳源时的反硝化速率更快,从而获得了相对更高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率(72.8%)。垃圾渗滤液的水解酸化液可作为反硝化碳源,但其反硝化速率和效率均低于垃圾渗滤液,而这种差异性是由基质性质本身决定的。

如表2所示,虽然垃圾渗滤液的SCOD浓度($17.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)仅为垃圾渗滤液水解酸化液的14.5%,但其中含有的易生物利用的VFAs(主要为乙酸)与SCOD的比值,即VFAs/SCOD却高达354.8,高于垃圾渗滤液的水解酸化液。因此,在相同COD投加量的初始条件下,垃圾渗滤液可以提供更多的VFAs用于反硝化,从而达到更高的比反硝化速率和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率。而经过3 d的水解酸化后,水解酸化液的SCOD浓度升高($120\sim 125\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),可见,垃圾渗滤液中含有的颗粒性有机物水解产生了大量溶解性有机物。虽然2种 pH 条件下产生的SCOD差别不大,但 $\text{pH}=11$ 条件下的水解酸化液中VFAs浓度却不到 $\text{pH}=8$ 条件下的20%,且比垃圾渗滤液中VFAs总量低。其原因可能是,经过水解酸化产生的VFAs被产甲烷菌所利用,VFAs的消耗速率大于产酸速率^[22]。MA等^[23]发现,碱性条件能促进剩余污泥的水解过程产生更多的SCOD,但是中性条件($\text{pH}=7$)比碱性条件($\text{pH}=11$)更有利于提高VFAs的产量。然而,在本研究中,相对较高的VFAs/SCOD并未使 $\text{pH}=8$ 条件下的水解酸化液获得更高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率,其原因可能在于该条件下产生的水解酸化液中含有大量的丙酸(丙酸/SCOD=73.2),其含量是碱性水解酸化液的10倍以上^[24]。据报道^[25-26],从代谢途径的复杂程度来看,反硝化菌优先利用乙酸作为碳源,其次是丁酸和丙酸。宋成康等^[27]发现,在相同碳源浓度的条件下,以丙酸为碳源的反硝化系统的脱氮效率仅为41.9%;而以乙酸为碳源的系统脱氮效率可高达97.6%,且丙酸和乙酸1:1混合碳源的系统硝态氮还原速率仅为乙酸为单一碳源时的18%。这说明丙酸的存在不利于反硝化脱氮。此外,2种水解酸化液为碳源时 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的变化趋势较为一致(如图3(b)所示),均在前30 min内达到最高($4.5\sim 6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)后逐

渐下降,且碱性水解酸化液为碳源时的 NO_2^- -N积累量相对略高。

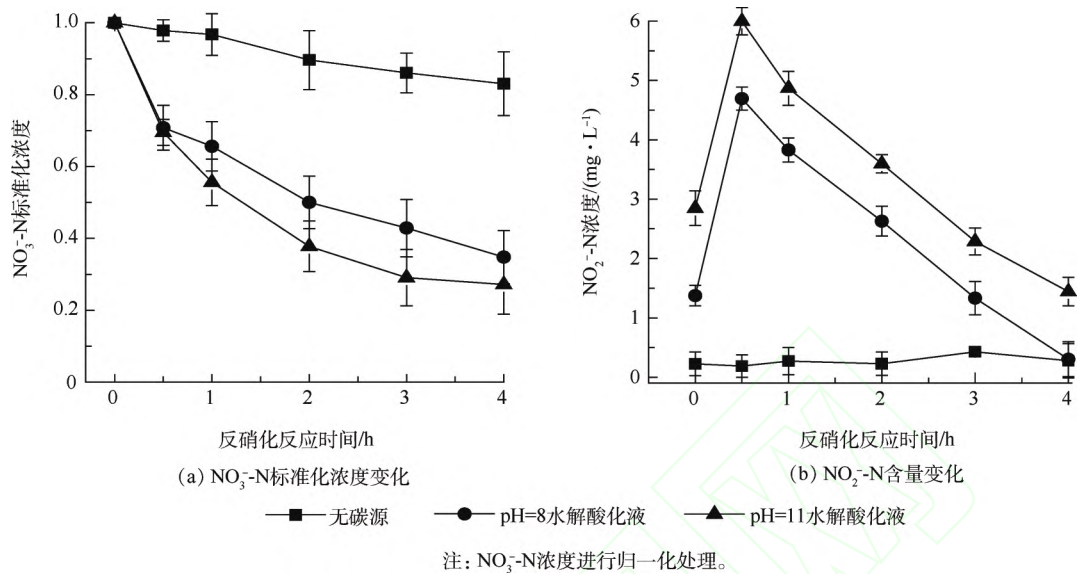


图3 垃圾渗滤液水解酸化液为反硝化碳源时 NO_3^- -N标准化浓度和 NO_2^- -N含量变化

Fig.3 Variations in the normalized nitrate concentrations and nitrite concentrations with denitrifying carbon source of landfill leachate hydrolysis acidification liquor

表2 垃圾渗滤液及其水解酸化液的性质及其作为碳源时的反硝化效果

Table 2 Characteristics and denitrification performance using landfill leachate and its hydrolysis acidification liquor as carbon sources

检测指标	垃圾渗滤液	垃圾渗滤液的水解酸化液	
		pH=8	pH=11
SCOD/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	17.8	120	125
VFAs总量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	6 333.7	22 955.5	5 085.9
VFAs/SCOD	355.8	191.3	40.7
乙酸/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	6 333.7	12 687.1	2 387.9
丙酸/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.0	8 788.6	702.3
丁酸/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.0	1 479.8	1 995.7
乙酸/SCOD	355.8	105.7	40.7
丙酸/SCOD	0.0	73.2	5.6
最大比反硝化速率/($\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$)	8.8	4.8	4.5
NO_3^- -N去除率/%	97.2	65.2	72.8

注:VFAs/SCOD、乙酸/SCOD与丙酸/SCOD中的VFAs、乙酸、丙酸的单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以COD计),SCOD的单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;VFAs、乙酸、丙酸、丁酸以COD计,最大比反硝化速率以MLSS计。

3 结论

1) 在实际城镇污水处理厂的运行过程中,与未投加碳源相比,补充乙酸钠为碳源后TN平均去除率仅提高了约3%;而在进水中混合垃圾渗滤液作为补充碳源后,TN平均去除率又提高了10%左右,且出水TN达到国家一级A类标准。

2) 在相同初始COD/ NO_3^- -N条件下,垃圾渗滤液与乙酸钠作碳源时 NO_3^- -N去除率均高达97%以上;但垃圾渗滤液作碳源的最大比反硝化速率可以达到 $8.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以MLSS计),是乙酸钠的1.7倍。

3) 中性和碱性条件下产生的垃圾渗滤液水解酸化液作为反硝化碳源时,反硝化效果相差不大, $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率都约为70%;相比之下,虽然中性条件下的水解酸化液中VFAs的含量更高,但大量存在的丙酸不利于反硝化脱氮过程。建议通过进一步优化水解酸化条件,得到适宜的VFAs含量及组成的水解酸化液。

参 考 文 献

- [1] MANDAL P, DUBEY B K, GUPTA A K. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 250-273.
- [2] RENO S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150: 468-493.
- [3] ISKANDER S M, ZHAO R Z, PATHAK A, et al. A review of landfill leachate induced ultraviolet quenching substances: Sources, characteristics, and treatment[J]. *Water Research*, 2018, 145: 297-311.
- [4] 石明岩,冯兆继,余建恒,等.城市污水混合垃圾渗滤液脱氮试验研究[J].*环境工程*, 2010, 28(5): 39-42.
- [5] 刘建国,倪哲,罗辉,等.垃圾龄对填埋场好氧修复供氧和加速稳定化效果的影响[J].*环境工程*, 2016, 34(2): 14-18.
- [6] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [7] SAHINKAYA E, DURSUN N, OZKAYA B, et al. Use of landfill leachate as a carbon source in a sulfidogenic fluidized-bed reactor for the treatment of synthetic acid mine drainage[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 48: 56-60.
- [8] 段存礼,顾瑞环,罗辉,等.青岛李村河污水厂升级改造工程设计及运行[J].*中国给水排水*, 2011, 27(12): 66-70.
- [9] 唐凤喜,魏瑞霞,司军,等.水解酸化预处理垃圾渗滤液的研究与实践[J].*工业水处理*, 2012, 32(11): 51-54.
- [10] 郑晓英,乔露露,王慰,等.碳源对反硝化生物滤池运行及微生物种群的影响[J].*环境工程学报*, 2018, 12(5): 1434-1442.
- [11] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 操家顺,侯梁浩,方芳,等.温度及外加碳源对生物脱氮除磷过程的影响[J].*环境工程学报*, 2013, 7(6): 2013-2018.
- [13] 袁敏,周琪,杨殿海,等.垃圾渗滤液为碳源时A²O法的脱氮除磷研究[J].*中国给水排水*, 2008, 24(11): 27-29.
- [14] 张永梅.餐厨垃圾碳源的有效回收与强化脱氮原理的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [15] 阿拉木斯,蔡碧婧,王峰,等.碳源对污水处理反硝化过程及细菌种群的影响[J].*四川环境*, 2015, 34(1): 13-18.
- [16] 赵庆良,李湘中.垃圾渗滤液中的氨氮对微生物活性的抑制作用[J].*环境污染与防治*, 1998, 20(6): 1-4.
- [17] 张弛,王国红,李晓姣,等.北方城市垃圾渗滤液水量水质变化特征[J].*环境工程学报*, 2015, 9(11): 5421-5426.
- [18] 熊建英,郑正.垃圾填埋场渗滤液溶解性有机质特性及其去除技术综述[J].*环境化学*, 2015, 34(1): 44-53.
- [19] SOTO O, ASPÉ E, ROECKEL M. Kinetics of cross-inhibited denitrification of a high load wastewater[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 40(6): 1627-1634.
- [20] 马娟,王丽,彭永臻,等.FNA的抑制作用及反硝化过程的交叉影响[J].*环境科学*, 2010, 31(4): 1030-1035.
- [21] 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.
- [22] DAHIYA S, SARKAR O, SWAMY Y V, et al. Acidogenic fermentation of food waste for volatile fatty acid production with co-generation of biohydrogen[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 182: 103-113.
- [23] MA H J, CHEN X C, LIU H, et al. Improved volatile fatty acids anaerobic production from waste activated sludge by pH regulation: Alkaline or neutral pH?[J]. *Waste Management*, 2016, 48: 397-403.

- [24] 贺诗雅, 方茜, 肖英豪, 等. pH调控对淘米水厌氧发酵的挥发性脂肪酸组成及奇偶数比率的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 323-328.
- [25] ELEFSINIOTIS P, WAREHAM D G, SMITH M O. Use of volatile fatty acids from an acid-phase digester for denitrification [J]. Journal of Biotechnology, 2004, 114(3): 289-297.
- [26] ELEFSINIOTIS P, LI D. The effect of temperature and carbon source on denitrification using volatile fatty acids[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 28(2): 148-155.
- [27] 宋成康, 秦健, 王亚宜, 等. 碳源对反硝化除磷效能及 N_2O 产生的长期影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(12): 11-16.

(本文编辑:金曙光,郑晓梅,张利田)

Nitrogen removal enhancement with landfill leachate as supplemental carbon source for denitrification

XU Chenlu¹, YIN Zhixuan^{1*}, LI Chunyu¹, BI Xuejun¹, GU Ruihuan²

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

2. Qingdao Capital Ruihai Water Co. Ltd., Qingdao 266042, China

*Corresponding author, E-mail: yzxqt@163.com

Abstract Because of containing large amount of readily biodegradable volatile fatty acids in landfill leachate, it is expected to use this leachate as a type of supplemental carbon source for denitrification in municipal wastewater treatment plant, which will have great significance in cost reduction of external carbon source and resource utilization of landfill leachate. The nitrogen removal effect was investigated when the landfill leachate was taken as supplemental carbon source in a municipal wastewater treatment plant. Furthermore, the denitrification efficiencies were compared among different carbon sources, such as traditional methanol and sodium acetate, landfill leachate and its hydrolysis acidification liquor at different pH. The results show that total nitrogen removal efficiency only increased by 3% with sodium acetate as external carbon source, but increased by about 10% when landfill leachate was mixed in the influent of a municipal wastewater treatment plant. In the batch tests, NO_3^- -N removal efficiencies could reach over 97% when landfill leachate or sodium acetate was taken as carbon source, respectively, while the maximum specific denitrification rate with landfill leachate carbon source was $8.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (calculated by MLSS), which was 1.7 times with sodium acetate. There is almost no difference in the denitrification efficiencies between neutral and alkaline hydrolysis acidification liquor carbon sources of landfill leachate, the maximum specific denitrification rates were $4.5 \sim 4.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (calculated by MLSS), and nitrate removal efficiencies were only 70%. Thus, whether landfill leachate and its hydrolysis acidification liquor can be taken as an alternative external carbon source for nitrogen removal enhancement is dependent on its own characteristics.

Keywords resource recovery from landfill leachate; external carbon source for nitrogen removal; denitrification; hydrolysis and acidification