

生物组合工艺处理垃圾渗滤液的研究进展

宋燕杰, 彭永臻, 刘 牡, 吴莉娜

(北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室 北京 100124)

摘 要: 阐述了垃圾渗滤液的来源和特点, 以及垃圾渗滤液的现有处理方法, 从第二代厌氧反应器-好氧反应器组合、第三代厌氧反应器-好氧反应器组合、厌氧生物膜法-好氧组合、其他生物组合 4 个方面综述了生物组合工艺处理垃圾渗滤液的最新研究进展, 并针对各类生物组合工艺的优缺点提出了一些建议和展望。

关键词: 垃圾渗滤液; 生物组合工艺; 研究进展

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2011)04-0009-005

随着工商业的发展和人们生活水平的提高, 城市生活垃圾总量和单位产量都在不断增长。在城市生活垃圾处理的投资和运行费用上卫生填埋比其他处理方法(如焚烧、堆肥等)更经济, 因此卫生填埋作为城市生活垃圾处理的首选方法而被人们接受和采用。然而, 卫生填埋会产生大量垃圾渗滤液, 据 2010 年度最新调查报告显示, 我国城市垃圾填埋场所排放的渗滤液产生化学需氧量 32.46 万吨, 氨氮 3.22 万吨, 渗滤液作为一种污染严重的废水其处理已经成为科研热点。

1 垃圾渗滤液的来源及特性

垃圾渗滤液由渗透到填埋场中的雨水、垃圾内部生物降解产生的水分和垃圾本身含有的水分形成, 其性质取决于垃圾的成分、填埋时间、气候条件等多种因素, 具体如下: (1) 有机物浓度高且污染物种类繁多; (2) NH_4^+-N 含量高, 营养元素比例失调; (3) 水质、水量变化大; (4) 重金属离子含量高, 包括 Cd、Cr、Hg、Pb 等多种重金属离子。如果在垃圾渗滤液的收集处理上不谨慎, 它可能成为土壤、地表水和地下水潜在的污染源^[1]。

2 目前垃圾渗滤液的处理技术

鉴于垃圾渗滤液的特性, 其处理既包含常规废水处理技术的共同之处, 又明显带有其自身的特点。目前, 渗滤液的主要处理方法有: 土地处理法、物化

处理法和生物处理法。

土地处理法主要通过土壤颗粒的过滤、吸附和沉淀及微生物降解和转化作用处理渗滤液, 具有投资少、运行费用低等优点, 然而其因占地面积大、效率受气候温度影响较大、容易引起土地污染等因素而受到限制。物化处理法主要包括反渗透(RO)^[2]、Fenton^[3]、电化学法^[4]、 H_2O_2 强化 IMA 工艺^[5]等多种方法, 处理效果不易受渗滤液水质水量的影响, 出水水质稳定, 一般存在处理费用高的缺点。生物处理法包括厌氧处理、好氧处理、缺氧/好氧(A/O)混合处理等。近年来出现了一些新型工艺(如部分硝化厌氧氨氧化反硝化耦合技术^[6]、膨胀颗粒污泥床反应器 EGSB^[7]、同步厌氧好氧反应器 SAA^[8]) , 但新型工艺出现时间较短, 研究相对不成熟, 实际应用较少。生物处理具有处理效果好、运行成本低、实际应用广泛等优点, 是目前垃圾渗滤液处理中采用最多的方法之一。

垃圾渗滤液处理的方法虽多种多样, 但各具优缺点, 采用单一工艺处理, 出水水质往往很难令人满意, 须将处理工艺由单一化向多元化发展, 通过工艺的适当组合, 取长补短。在各种组合工艺中, 生物组合工艺具有处理效果好、运行成本低等优点, 是目前应用较多、较为经济有效的方法。

3 生物组合工艺处理垃圾渗滤液

3.1 第二代厌氧反应器-好氧反应器组合工艺

熊小京^[9]采用厌氧 BF 与好氧 MBR 组合工艺处

收稿日期: 2010-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(50978003), 北京市自然科学基金重点项目(8091001)

作者简介: 宋燕杰(1988-), 男, 硕士研究生, 从事垃圾渗滤液的生物处理及其过程控制的研究; E-mail: songyanjie@emails.bjut.edu.cn

联系作者: 彭永臻, 博士、教授; E-mail: pyz@bjut.edu.cn

理实际垃圾渗滤液。在处理稀释 10 倍的渗滤液时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 平均去除率分别稳定在 90% 和 65% 左右, 在处理稀释倍数低的渗滤液时, 外加碳源提高 C/N 后, 可有效地增强厌氧柱的反硝化能力。

Henderson^[10]等采用厌氧生物滤池(AF)-生物转盘反应器(RBC)组合工艺处理垃圾渗滤液。AF 主要去除 BOD、COD, 对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 去除影响较小, BOD 平均去除率为 92%。RBC 主要起硝化作用, 在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 时能获得大于 95% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率, 此外, 由于同步硝化反硝化或者好氧反硝化, RBC 系统中 TN 去除率达到 54%。

Osman^[11]采用实验室规模的两级升流式厌氧污泥床反应器(UASB)/连续流完全混合反应器(CSTR)处理垃圾渗滤液。从启动到稳定运行的过程中, 渗滤液进水的 COD 从 $5400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $20000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 有机负荷(OLRs)由 $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高到 $16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 一级 UASB、二级 UASB 反应器和系统(两级 UASB-CSTR)的 COD 去除率分别达到 79%、40%~42% 左右和 98% 左右, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 278~679 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率约为 99.6%。

与全程硝化相比, 短程硝化可减少能耗节省碳源^[12], 实现短程硝化反硝化是提高渗滤液生物处理效率的有效途径。Peng 和 Zhang 等^[13-14]采用两级 UASB-A/O 系统处理晚期渗滤液, 在不经吹脱等物化预处理、不投加药剂的条件下, 实现了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 几乎全部去除, 当系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷低于 $0.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率大于 98%, 获得 90%~99% 的短程硝化率, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度小于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总无机氮 TIN 去除率 70%~80%, 实现了稳定的短程硝化反硝化。

Wu 等^[15]采用两级 UASB-A/O 系统处理城市生活垃圾晚期渗滤液, 当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到 97%, 短程硝化率稳定在 89%, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比 Peng 和 Zhang 等的高, 分析原因可能为 Wu 处理的渗滤液与后者处理的晚期渗滤液相比, 可生物降解有机物浓度偏低, 平均的 BOD/TN 只有 2 左右, 经两级 UASB 处理后可生物降解有机物浓度较低, 使 A/O 池缺氧段反硝化不足, 进而影响后续 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化。

Sun 等^[16]采用两级 UASB-SBR 组合工艺处理实际垃圾填埋场渗滤液, 在进水 COD 平均为 $11950 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $982.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 出水分别为 $375.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 96.7% 和 99.7%。在冬季低温条件下, SBR 反应器

也实现了接近完全硝化和反硝化, 出水 TN 小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到了深度脱氮的目的。

在 SBR 反应器中, pH、ORP、DO 与短程硝化反硝化的进行程度存在着一定的相关性, 可通过在线测量并判断 pH 与 ORP 曲线上的“氨谷”和“亚硝酸盐峰”确定硝化与反硝化过程的结束点, 时晓宁等^[17]在 UASB-SBR 系统中应用在线控制成功实现高氨氮垃圾渗滤液短程生物脱氮, 当系统进水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $2114 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率达到 99%, TN 质量浓度小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对 COD 的去除率为 90%。

Castillo^[18]对上流式厌氧污泥床反应器(UASB)-生物转盘反应器(RBC)组合工艺处理垃圾填埋场渗滤液的可行性进行了研究。当 UASB 反应器的 COD 容积负荷和 HRT 分别为 $3.273 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 54 h 时, COD 去除率达到最高水平(62%)。RBC 系统使用穿孔醋酸酯盘片较为合适, COD 去除率约为 65% 且具有较好的生物稳定性。

3.2 第三代厌氧反应器-好氧反应器组合工艺

高峰等^[19]将 ASBR 和 SBR 反应器组合起来, 形成一种序批式操作的城市垃圾渗滤液处理工艺。ASBR 作为厌氧消化反应器, 主要完成有机物的初步降解, 有利于有机物和氮的后续好氧生物去除。经组合工艺处理后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量稳定在 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 但出水 COD 浓度较高, 经添加混凝剂聚合硫酸铁(PFS)混凝沉淀处理后废水中 COD 可降至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。李晨等^[20]也利用该组合工艺处理早期渗滤液, 当 ASBR 的 HRT 定为 36 h, SBR 排水比 ≤ 0.5 时, 反应器内反硝化反应产生的碱度和硝化反应消耗的碱度较为平衡, pH 稳定在适宜硝化菌、反硝化菌生存的范围, 脱氮及去除有机物的效果较好, COD 去除率为 88%~90%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 96%~98%。

高艳娇等^[21-22]研究两级 UBF-两级 BCOR 处理渗滤液的启动和稳定运行效率, 该组合工艺的启动分为两个阶段, 先在低水力负荷下进行, 使微生物逐步适应反应器内的环境, 帮助它们在污泥床和填料上固定下来, 然后提高水力负荷, 提高污泥性能, 进而形成污泥床和挂膜。当水力负荷为 $0.42 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 启动时间为 60 d 时, 出水 COD 平均去除率为 67.4%; 在稳定运行阶段, COD 总去除率平均为 87.8%, BOD₅ 总去除率平均为 93.5%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 总去除率平均为 72.4%, 去除效果较好。该工艺优点在于充分利用两种反应器的优点, UBF1 内酸化菌占优势, 发挥

了水解酸化作用,可生化性提高,UBF2内产甲烷菌占优势,发挥了生物降解作用,有助于后续BCOR中获得较大的生物量以达到较好的处理效果。

黄琪等^[23]采用氨吹脱-UBF-A-SBR工艺对垃圾填埋场渗滤液进行处理,氨吹脱高效地去除氨氮,保证后续生物组合工艺正常运行;厌氧UBF不但具有高效去除有机物的功能,还能提高渗滤液的可生化性,SBR构筑物简单,处理效果良好,整个工艺具有极强的耐冲击负荷能力,当进水COD为10~15 g·L⁻¹、BOD₅为3~5 g·L⁻¹时,出水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN分别为600、50、10、100 mg·L⁻¹左右,其中COD、BOD₅、NH₄⁺-N和TN去除率分别达到了95%、99%、99.5%和97%。整个工艺流程简单,管理操作方便,自动化程度高,为国内其他垃圾填埋场渗滤液的处理提供了范例。

刘海涛等^[24]采用上流式厌氧复合床反应器(UBF)-缺氧/好氧膜生物反应器(AOMBR)工艺处理垃圾渗滤液,当进水渗滤液COD在10 000 mg·L⁻¹左右,出水COD为1 000 mg·L⁻¹左右,COD总去除率>90%。AOMBR系统能够实现稳定脱氮,进水NH₄⁺-N最高质量浓度达2 000 mg·L⁻¹左右,出水NH₄⁺-N质量浓度为50~100 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N去除率为95%左右。

桂林市冲口垃圾卫生填埋场垃圾渗滤液处理中,采用折流式厌氧反应器(ABR)-氧化沟(PID)-膜生物反应器(MBR)组合工艺进行处理。工程中在ABR上向流部分设置填料,使HRT与污泥的停留时间(SRT)较好分离,其抗冲击负荷能力强,处理效果好,COD平均去除率可达75%以上,减小后续PID-MBR的负荷,出水进入PID-MBR,PID-MBR分为缺氧段、好氧段、膜分离段3段,经过缺氧段反硝化、好氧段硝化和膜分离部分出水NH₄⁺-N质量浓度小于15 mg·L⁻¹。系统经过了2年的实际运行,由于各工艺取长补短,从而提高了系统运行的稳定性和可靠性,增强了系统对水质变化的适应能力,确保了出水各项指标的稳定^[25]。该工艺采用了MBR系统,处理效果良好,但系统投资偏高,如果在处理初期可生化性较好的渗滤液时,仅使用ABR-PID组合工艺处理,随着填埋年限的增加,渗滤液水质可生化性变差时,再进行升级改造增加MBR,这样就能适应远期水质的变化,也利于减少工程建设初期投资和运行成本。

3.3 厌氧生物膜-好氧组合工艺

Chen等^[26]研究厌氧/好氧MBBR能够有效处

理高浓度城市垃圾渗滤液,可同步去除COD和NH₄⁺-N。水力停留时间和容积负荷对系统的处理效果影响较大,当好氧MBBR的HRT大于1.25 d,系统对NH₄⁺-N的总去除率始终在97%以上,最终出水NH₄⁺-N质量浓度在6.13~9.87 mg·L⁻¹;当系统进水的COD容积负荷在4.08~15.70 kg·m⁻³·d⁻¹之间,系统COD去除率为92%~95%;当承受渗滤液的冲击负荷时,厌氧MBBR受到冲击的影响比较大,去除率约下降了26.6%,而整个串联系统则只下降了7.08%。这说明后续的好氧工艺对有机负荷的冲击起到了缓解作用,提高了整个系统的抗冲击能力。抗冲击能力在实际工程应用中有较大实际意义,垃圾渗滤液的产量、水质受很多因素影响(如降雨、气候等),出现高强度的冲击负荷在所难免,厌氧/好氧MBBR具有较强的抗冲击负荷的能力,利于保证实际工程中出水水质的稳定。

杜月等^[27]采用好氧MBBR处理经厌氧处理后的渗滤液,在pH为8.0时亚硝酸盐氮积累率达到82.7%,DO为2 mg·L⁻¹时较好的平衡NH₄⁺-N去除率和亚硝酸盐氮积累率。Kulikowska^[28]在NH₄⁺-N负荷为0.14 g·m⁻³·d⁻¹的条件下通过两级MBBR实现完全硝化,并取得了很高的亚硝积累率,NO₃⁻-N和NH₄⁺-N质量浓度均低于1 mg·L⁻¹。

Jeong-Hoon等^[29]采用升流式厌氧生物膜反应器-好氧工艺处理渗滤液,在厌氧反应器内同时进行反硝化脱氮和产甲烷,而有机物的去除和氨氮的硝化在好氧反应器内进行。厌氧反应器COD最高负荷为15.2 kg·m⁻³·d⁻¹,好氧反应器最高NH₄⁺-N去除速率和NO₃⁻-N最大硝化速率分别为0.84 kg·m⁻³·d⁻¹和0.50 kg·m⁻³·d⁻¹(两速率的差别是由氨吹脱和微生物生长消耗导致),系统的COD去除率达到了80%左右。

郭勇等^[30]利用厌氧流化床(AnBFB)-好氧流化床(ABFB)组合工艺处理垃圾渗滤液,组合工艺对低NH₄⁺-N浓度的垃圾渗滤液具有较好的处理效果,当系统的总停留时间在10.5 h时,进水COD范围为2 817.2~4 383.88 mg·L⁻¹,进水NH₄⁺-N质量浓度为303.12~445.43 mg·L⁻¹,系统对COD去除率为86.79%~98.85%,对NH₄⁺-N的去除率为81.14%~94.01%。当AnBFB的COD和NH₄⁺-N去除率较高时,有利于提高系统的COD和NH₄⁺-N去除率,在AnBFB中,实现了部分厌氧氨氧化的效果,厌氧流化床出水NH₄⁺-N质量浓度为199.5~275.2 mg·L⁻¹;在ABFB中,经过氮质量平衡方程计算,有部分氨

氮的去除,分析原因可能是因 ABFB 中采用多孔载体,在空隙内部产出局部的缺氧区,使氨氮通过同步硝化反硝化(SND)得以去除。

3.4 其他生物组合工艺

Trabelsi 等^[31]研究了缺氧-好氧处理垃圾填埋场渗滤液,在 90 d 的停留时间中,缺氧反应器 BOD₅、COD、TOC、NH₄⁺-N 和 TKN 的去除率分别为 91%、46%、65%、45%和 63%,缺氧出水采用 3 级流淹没曝气生物反应器进一步处理,好氧反应器对于 COD 和 NH₄⁺-N 的去除率分别可达 84%和 60%,整个组合工艺的 BOD₅ 去除率为 95%,COD 为 94%,NH₄⁺-N 为 92%。

某垃圾填埋场渗滤液处理工程使用水解酸化反应器(HAR)-好氧生物接触氧化反应器(ABOR)-超滤膜工艺,系统的 COD 和 NH₄⁺-N 去除率分别达到 99.6%和 93.2%。HAR 在提高垃圾填埋场渗滤液的生物降解性方面起关键作用,而 ABOR 在去除渗滤液中有机物和氨氮方面发挥重要作用^[32]。

Trzcinski 等^[33-34]采用水解(HR)-浸入式厌氧膜生物反应器(SAMBR)-好氧膜生物反应器(AMBR)处理垃圾渗滤液,35℃时 HRT 低至 3.9 d, SRT 低至 45 d 下, SAMBR 中 COD 去除率仍可达 95%;当 SAMBR 中出现冲击负荷, AMBR 中 NH₄⁺-N 的去除效果并未受到冲击负荷的影响, AMBR 进水 NH₄⁺-N 质量浓度为 200~500 mg·L⁻¹,去除率超过 95%。并对比了厌氧膜生物反应器(AnMBR)-AMBR 系统与单独 AnMBR 处理水解后的渗滤液的性能,单独 AnMBR 在 HRT 为 1.6~2.3 d 时, COD 去除率高于 90%,在 200 d 的试验中并未发生难降解 COD 积累的现象;而在 AnMBR-AMBR 组合工艺中,即使 HRT 低至 0.4 d, AnMBR 的 COD 去除率也可以提高到大于 95%,出水 COD 没有抑制后续硝化,实现了 97.7% NH₄⁺-N 去除率。

动态膜生物反应器(DMBR)采用无纺布等微网作为基材,出水中的污泥或其他物质吸附在其表面形成动态膜, DMBR 在保留膜生物反应器工艺优点的同时可以大幅降低过滤组件的造价,同时还具有通量大、污染控制和清除简易等优点^[35-36]。董青松等^[37]采用新型玻璃纤维编织管为生物动态膜基材,耦合活性污泥反应器建立了一种管式动态膜生物反应器。在进行处理垃圾渗滤液小试研究中,所采用系统重力自流出水,无需抽吸泵,稳定连续运行近 80 d,膜通量维持在 3.75 L·m⁻²·h⁻¹ 左右,管式动态膜生物反应器对浊度、COD 和 NH₄⁺-N 都有很好的处理效果,

DMBR- 和 DMBR- 反应器正常运行期间浊度都在 1NTU 以下, COD、BOD₅ 和 NH₄⁺-N 平均去除率分别在 71%和 79%、97%和 96%、98%和 95%以上。

4 结语与展望

城市垃圾渗滤液是一种成分复杂的高浓度有机废水,水质水量变化大,使用传统单一工艺难以满足要求,需采用组合工艺。在众多形式的组合工艺中,生物组合工艺因其较高的 COD 和 NH₄⁺-N 去除率,较低的运行成本而受到国内外学者的关注。

(1) 第二代厌氧反应器-好氧反应器组合工艺研究较为广泛,该类生物组合工艺实现了有机物和氨氮硝化去除的时空分离, UASB-A/O 组合工艺就是典型代表。在 UASB-A/O 组合工艺中,通过出水回流,在 UASB 中通过反硝化和产甲烷实现氮和有机物的同步去除,高效的反硝化为 A/O 好氧段中硝化菌提供充足的碱度,在 A/O 系统中维持较高的 pH 和游离氨(FA),获得稳定的短程硝化实现高效的 NH₄⁺-N 去除。

(2) 第三代厌氧反应器(如 UBF、ABR、ASBR 等)是吸收第二代厌氧反应器优点开发出的,新一代反应器增设内循环和增加高径比提高污染物与微生物之间的传质效果并促进污泥颗粒化的快速实现,使得这些生物组合工艺在较高负荷下实现良好的有机物和氨氮去除效果。其中 ABR 还能提高晚期渗滤液的 BOD₅/COD 改善晚期渗滤液处理效果。

(3) 在厌氧反应器中添加填料,挂膜,形成厌氧生物膜反应器,通过与好氧工艺结合,组成厌氧生物膜-好氧组合工艺,该类组合工艺具有较好的抗冲击负荷能力,但填料会增加投资,运行中也存在填料流失的问题,增大运营费用。

(4) 其他生物组合工艺主要包括水解酸化-好氧组合,水解段出水中含有较多的低分子有机物,利于后续的反硝化脱氮,但水解段的有机物去除率相比第二代、第三代厌氧反应器略逊,这可能会加重后续好氧段负担,进而影响整个组合工艺系统的处理效果,此外水解酸化过程可控性还需要进一步的改善。

生物组合工艺在处理早期渗滤液方面优势较为明显,在晚期渗滤液处理上,因 C/N 低、COD 难生物降解等,生物组合工艺还存在着 COD 去除效率不高、脱氮流程复杂、TN 去除率低等不足。为了弥补不足,国内外学者提出更多新型生物组合工艺,它们既保留了传统生物组合工艺的优点又耦合了短程硝化、同时硝化反硝化、厌氧氨氧化等新型脱氮技术,

在处理中晚期渗滤液上具有很大的潜力。然而目前这些组合工艺大多数处于实验室研究阶段,这些生物组合工艺的顺利应用于实际工程,还需在提高处理效果、获得最佳运行条件、控制运行成本、高效的管理等方面深入研究。

参考文献:

- [1] Nehrenheim E, Waara S, Westholm J L. Metal retention on pine bark and blast furnace slag -on-site experiment for treatment of low strength landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 998-1005.
- [2] Halil Hasar, Sezahat A Unsal, Ubeyde Ipek, et al. Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1-3): 309-317.
- [3] Wu Yanyu, Zhou Shaoqi, Qin Fanghui, et al. Removal of humic substances from Landfill Leachate by Fenton oxidation and coagulation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, 88(4): 276-284.
- [4] Ane Urtiaga, Ana Rueda, Angela Ánglada, et al. Integrated treatment of landfill leachates including electrooxidation at pilot plant scale [J]. Journal of Hazardous Materials 2009; 166(2-3): 1530-1534.
- [5] Yang Deng, James D Englehardt. Kinetics and oxidative mechanism for H_2O_2 -enhanced iron-mediated aeration (IMA) treatment of recalcitrant organic compounds in mature landfill leachate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1-3): 370-375.
- [6] Chih-Cheng Wang, Po-Heng Lee, Mathava Kumar, et al. Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1-3): 622-628.
- [7] Liu Jianyong, Zhong Jiangping, Wang Yilan, et al. Effective bio-treatment of fresh leachate from pretreated municipal solid waste in an expanded granular sludge bed bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(5): 1447-1452.
- [8] Yang Zhiqian, Zhou Shaoqi. The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system[J]. Chemosphere, 2008, 72(11): 1751-1756.
- [9] 熊小京, 冯喆文. 垃圾渗滤液厌氧 BF/ 好氧 MBR 工艺的脱氮特性 [J]. 华侨大学学报: 自然科学, 2008, 29(1): 68-72.
- [10] Henderson J P, Atwater J W. High ammonia landfill leachate treatment using anaerobic filter and rotating biological contactor [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(5): 992-1000.
- [11] Osman Nuri A'gda'g, Delia Teresa Sponza. Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) systems [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(2): 895-902.
- [12] Ye L, Pijuan M, Yuan Z G. The effect of free nitrous acid on the anabolic and catabolic processes of glycogen accumulating organisms[J]. Water Research, 2010, 44(9): 2901-2909.
- [13] Peng Yongzhen, Zhang Shujun, Zeng Wei, et al. Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate[J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 883-892.
- [14] Zhang Shujun, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Organic matter and concentrated nitrogen removal by shortcut nitrification and denitrification from mature municipal landfill leachate[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(6): 647-651.
- [15] Wu Lina, Peng Chengyao, Zhang Shujun, et al. Nitrogen removal via nitrite from municipal landfill leachate[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(11): 1480-1485.
- [16] Sun Hongwei, Yang Qing, Peng Yongzhen, et al. Nitrite accumulation during the denitrification process in SBR for the treatment of pre-treated landfill leachate [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(6): 1027-1031.
- [17] 时晓宁, 王淑莹, 孙洪伟, 等. 应用在线控制实现高氨氮垃圾渗滤液短程生物脱氮[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 9-13.
- [18] Castillo E, Vergara M, Moreno Y. Landfill leachate treatment using a rotating biological contactor and an upward-flow anaerobic sludge bed reactor[J]. Waste Management, 2007, 27(5): 720-726.
- [19] 高锋, 李晨. 厌氧消化与 SBR 组合工艺处理城市垃圾渗滤液[J]. 环境工程, 2008, 26(6): 33-35.
- [20] 李晨, 高锋, 金卫红. 城市生活垃圾渗滤液的 ASBR-SBR 生物脱氮研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(5): 107-111.
- [21] 高艳娇, 张鑫, 李慧婷, 等. 两级 UBF- 两级 BCOR 工艺处理垃圾渗滤液启动研究 [J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2009, 9(4): 231-233.
- [22] 高艳娇, 赵丽红, 李慧婷, 等. 厌氧复合床 / 生物接触氧化反应器处理垃圾渗滤液[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(6): 47-49.
- [23] 黄琪, 李育杰, 李武. 生活垃圾填埋场渗滤液处理研究[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(1): 23-26.
- [24] 刘海涛, 李天增, 王成丽, 等. UBF-AOMBR 处理垃圾渗滤液中试 [J]. 环境工程, 2008, 26(3): 39-41.
- [25] 黎圣, 张英慧, 徐文妍, 等. ABR/ 氧化沟 / 膜生物反应器处理垃圾渗滤液[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2009, 12(1): 48-51.
- [26] Chen Sheng, Sun Dezhi, Chung Jong-Shik. Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic-aerobic moving-bed biofilm reactor system [J]. Waste Management, 2008, 28(2): 339-346.
- [27] 杜月, 陈胜, 孙德智. 移动床生物膜反应器对垃圾渗滤液短程硝化研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1039-1043.
- [28] Kulikowska D, Kaczowka E, Pokoj T, et al. Application of moving bed biofilm reactor (MBBR) for high-ammonium landfill leachate nitrification [J]. New Biotechnology, 2009, 25(s1): S351-S352.
- [29] Jeong-Hoon Im, Hae-Jin Woo, Myung-Won Choi, et al. Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system [J]. Water Research, 2001, 35(10): 2403-2410.
- [30] 郭勇, 陈晓东, 杨平. 厌氧流化床 - 外循环三相好氧流化床处理垃圾渗滤液[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(6): 97-102.
- [31] Ismail Trabelsi, Imen Sellami, Tarek Dhifallah, et al. Coupling of anoxic and aerobic biological treatment of landfill leachate[J]. Desalination, 2009, 246(1-3): 506-513.

(下转第 36 页)

- affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in the Netherlands[J]. *Water Research*, 2008, 42(10-11): 2349-2360.
- [17] 徐伟锋, 顾国维, 张芳. 混合液回流比对 A²/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. *化工学报*, 2007, 58(10): 2619-2623.
- [18] Her J J, Huang J S. Influences of carbon source and ratio on nitrate/nitrate denitrification and carbon breakthrough[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 54(1): 45-51.
- [19] Nyberg U, Aspegren H, Andersson B, et al. Full-scale applications of nitrogen removal with methanol as carbon source [J]. *Water Science and Technology*, 1992, 26(5/6): 1077-1086.
- [20] 刘长青, 毕学军, 张峰, 等. 低温对生物脱氮除磷系统影响的试验研究[J]. *水处理技术*, 2006, 32(8): 18-21.

DENITRIFYING PHOSPHORUS ACCUMULATION CHARACTERISTICS OF A²/O EBPR PROCESS UNDER LOW TEMPERATURE CONDITION

Yang Dianhai, Lu Wenjian, Wang Rongchang, Jiang Qinghua, Zhou Qi

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a pilot-scale anaerobic-anoxic-aerobic (A²/O) process for municipal wastewater treatment, the denitrifying phosphorus accumulation characteristics of enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process under low temperature condition (12±4)°C were investigated by controlling the influent flow loading rate and internal recirculation ratio. The experimental results based on Analysis of Variance (ANOVA) indicate that a strong correlation ($p < 0.05$) between effluent TP and NO_x-N concentration and denitrifying phosphorus accumulation characteristic was observed in the process. The optimum performance of denitrifying phosphorus removal and biological nutrient removal was achieved when influent flow rate was set at 2.5 m³·h⁻¹ and internal recirculation ratio was set at 150%. The effluent COD, TN and TP concentration were about 30±10 mg·L⁻¹, 5.6±2.9 mg·L⁻¹ and 0.4±0.2 mg·L⁻¹, respectively. The effluent water quality can meet the first class A criteria specified in discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment Plant (GB 18918—2002).

Keywords: EBPR; denitrifying phosphorus accumulation; A²/O; low temperature

(上接第 13 页)

- [32] Pi K W, Gao L X, Fan M X, et al. Two-stage biodegradation coupled with ultrafiltration for treatment of municipal landfill leachate [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2009, 87(5): 336-342.
- [33] Antoine P Trzcinski, Michael J Ray, David C. Stuckey. Performance of a three-stage membrane bioprocess treating the organic fraction of municipal solid waste and evolution of its archaeal and bacterial ecology[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1652-1661
- [34] Trzcinski A P, Stuckey D C. Continuous treatment of the organic fraction of municipal solid waste in an anaerobic two-stage membrane process with liquid recycle [J]. *Water Research*, 2009, 43(9): 2449-2462.
- [35] Zhang X Y, Wang Z W, Wu Z C, et al. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165(1): 175-183.
- [36] Liu Hongbo, Yang Changzhu, Pu Wenhong, et al. Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 148(2-3): 290-295.
- [37] 董春松, 樊耀波, 李刚, 等. 新型管式动态膜生物反应器及处理垃圾渗滤液的研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 747-753.

THE RESEARCH PROGRESS OF BIO-INTEGRATED PROCESS FOR LANDFILL LEACHATE TREATMENT

Song Yanjie, Peng Yongzhen, Liu Mu, Wu Lina

(Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Landfill leachate is the most important source of pollution of groundwater whose treatment has aroused extensive attention from scholars at home and abroad. The source and characteristics of landfill leachate, the main methods of landfill leachate treatment and their features were expounded. The bio-integrated processes can be divided into four categories: the second-generation anaerobic reactor-aerobic reactor combination; the third generation of anaerobic reactor-aerobic reactor combination; biofilm-aerobic reactor combination; the others which were mainly overviewed. Also the advantages and disadvantages were explained. At that basis some suggestions and prospects were simply proposed.

Keywords: landfill leachate; bio-integrated process; research progress