

污水除臭技术的应用及研究现状^{*}

张颖 靳少培 姬亚芹 王秀艳

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要 近年来城市污水处理设施数量不断增加,由此产生的臭气污染严重影响了环境空气质量,并严重损害了城市居民健康。污水脱臭问题引起广泛关注。通过介绍除臭技术在污水处理厂的实际应用,分析了常用除臭技术的优缺点和适用条件,阐述了目前低温等离子体法及纳米材料净化法等除臭新技术的研究现状,同时对除臭技术发展趋势进行展望,为实际工程应用提供指导。

关键词 污水 恶臭气体 除臭技术 应用 研究现状

The application and research status of deodorization techniques for wastewater ZHANG Ying, JIN Shaopei, JI Yaqin, WANG Xiuyan. (College of Environment Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: The number of urban wastewater treatment facilities is increasing constantly in recent years. The resulting odor pollution has affected the ambient air quality and damaged the health of urban residents seriously. The sewage deodorization has aroused widespread concern in now days. This paper introduced the practical application of deodorization technologies used in wastewater treatment plants, and analyzed the advantages, disadvantages as well as the applicable conditions of common deodorization technologies. The research status of some new technologies, including low temperature plasma and the nano-materials purification technology, were expounded. This paper also prospected the development tendency of deodorization technologies, which could provide guidance for engineering applications.

Keywords: wastewater; odorous gas; deodorization technology; application; research status

随着中国城市化进程加快,城市污水处理设施更加完善,其意义在于减少污染、保护环境。污水处理设施作为城市核心区域广泛分布的固定市政设施,在运行过程中会产生大量恶臭气体。恶臭是指一切能刺激人的嗅觉器官,引起人们不愉快感觉,损害生活环境及人体健康的气味^[1]。城市中异味对环境质量和人民生活均会产生不可忽视的影响。随着人们环境意识及对生活环境质量要求的提高,对异味造成的不满和控告增加,恶臭治理引起国家及有关部门重视。对目前常用除臭技术进行分析,对在实际工程中选择合理高效的除臭技术,具有重要的意义。同时,要进一步探究除臭技术的研究现状及未来的发展方向。

1 污水臭气组成

中国城市污水组成复杂,无论生活污水还是工业污水,在运输及处理过程中必然会产生臭气。日常运行时,搅拌等水流湍动促进污水中原有及产生的恶臭污染物向外释放,形成恶臭污染。恶臭污染物有刺激性气味,除使人产生不愉快外,对呼吸、消

化、循环、神经和内分泌系统都会产生损害。常见恶臭成分主要有3类^[2]:(1)含硫化合物,包括 H_2S 、甲硫醚、甲硫醇等;(2)含氮化合物,包括 NH_3 、吡啶、二甲胺等;(3)含碳、氢、氧化合物,如低级醇、脂肪酸、醛等。一般,恶臭污染物多为复合形式,各组分强度与污染物种类、浓度有关。国内外对污水处理厂臭气状况进行大量调查分析,结果表明臭气中主要恶臭污染物为 H_2S 、 NH_3 ^[3-4]。其中,含量最多、浓度最大的是 NH_3 ,其次为 H_2S 、甲硫醚等;决定人们感受程度的,甲硫醇最大,其次是 H_2S 、甲硫醚和 NH_3 。

目前,中国城镇污水处理厂执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)规定,另外结合恶臭污染物最小感知浓度(臭阈值)的要求,确定厂界排放标准: $H_2S \leq 0.047 \text{ mg/m}^3$, $NH_3 \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$,硫醇 $\leq 0.0021 \text{ mg/m}^3$,甲硫醚 $\leq 0.07 \text{ mg/m}^3$,二甲二硫 $\leq 0.06 \text{ mg/m}^3$,臭气浓度(量纲1)20^[5]。为保证良好生存空间及人们身体健康,有效控制污水臭气污染成为亟待解决的问题。

第一作者:张颖,女,1977年生,博士,副教授,主要从事水污染控制技术研究。

^{*} 天津市科技支撑计划重点项目(No. 10ZCGYSF02030);环保公益性行业科研专项经费项目(No. 201009034)。

2 除臭技术应用

要有效解决污水臭气问题,必须综合考虑各方面因素,对具有不同水质、臭气散发特征的污水处理厂采取不同措施,通常从恶臭源治理和溢出气体治理2个方面进行。

2.1 恶臭源治理

恶臭源治理^[6-7]是除臭技术的重要组成部分,包括恶臭源抑制和散发控制。恶臭源抑制可通过投放适当化学药剂等方法控制化合物所处状态,保持系统良好运行,减少恶臭污染物产生。散发控制主要是通过通过对恶臭源集气和排气系统的设计,利用较少的排气量达到较好的通风效果,控制后续脱臭装置规模。对恶臭源的有效收集是整个恶臭控制的重要环节,可通过密闭臭气源、在局部设吸风口等措施收集臭气。

芮旭东^[8]对杭州市七格污水处理厂一、二、三期工程采用的曝气池加盖除臭技术进行了研究,结果表明:采用土壤除臭技术和膜结构加盖方式都可促进 H_2S 和臭气浓度的去除;膜结构的加盖形式在有效收集臭气的同时还节约了工程投资,为同类污水处理厂加盖除臭提供参考。

2.2 溢出气体治理

对溢出气体的治理是除臭的主要方面。城市污水处理厂除臭即是通过某些方法将恶臭分子掩蔽、吸收、破坏或降解的过程。近年来,国内除臭技术快速发展,由传统的物理化学方法(掩蔽法、吸附法、吸收法、燃烧法和普通氧化法等)和生物法(土壤过滤法和生物洗涤法等)逐步向天然植物液除臭法、高能离子除臭法和活性氧化法等新的生物法转变。另外,多种方法联合也成为重要发展趋势。

2.2.1 生物法

生物法是利用自然界的微生物和细菌对恶臭硝化降解自然除臭,其原理是使收集的废气在适宜条件下通过长满微生物的固体载体,被填料吸收并被微生物氧化分解^[9]。除臭过程大致分为从气相到液相传质、恶臭污染物进入微生物、恶臭分子作为营养物质被分解利用3个阶段^[10]。生物法具有除臭效率高、设备简单、费用低等优点,在城市污水处理厂应用最广泛。

李慧丽等^[11]改造了臭气收集系统和生物滤池内喷淋管路,并使用新型生物填料除臭。结果表明, H_2S 的最大去除率可达96.2%; NH_3 的去除率提高到近100%。席劲瑛等^[12]实验考察了不同填料(珍

珠岩、矿物球、竹片和沸石)对 H_2S 的去除性能、pH缓冲能力等,结果表明,一定条件下,生物滤塔处理后的 H_2S 浓度均可长期稳定达到GB 14554—93中二级标准。王明健等^[13]对某污水处理厂运行的生物滤池排放气体进行监测, H_2S 和 NH_3 分别维持在0.04~0.06、1.0~1.3 mg/m³,都达到国家排放标准。刘建伟等^[14]对山东某城市污水处理厂的除臭生物滤池的运行效果和影响因素进行了研究,结果表明,在适宜的进气量、停留时间、填料、臭气浓度、温度等条件下,主要恶臭污染物的去除率均达到国家有关要求。青岛罗芳污水处理二期工程厌氧池除臭设备进气 H_2S 、 NH_3 分别为0.75、0.5 mg/m³,经生物滤池除臭,去除率分别为93.3%、90%^[15]。

天津市咸阳路污水提升泵站^[16]采用生物滴滤床净化系统处理臭气。结果表明,对恶臭特征污染物(H_2S 、 NH_3)的去除率长期稳定在98%以上,达到排放标准。BRAM等^[17]应用生物滴滤池处理甲硫醚,当进气甲硫醚负荷为57 g/(m³·h)时去除率达92%。周炜煌等^[18]研究采用生物滴滤塔净化含 H_2S 与 NH_3 臭气,结果表明,最佳生态条件下,两者去除率可达90%以上。眭光华等^[19]研究了用生物滴滤床除臭系统净化污泥浓缩池产生的臭气,结果表明,该系统对 H_2S 、 NH_3 和臭气浓度的平均去除率分别为91.8%、87.8%和85.8%。李桂荣等^[20]提出采用生物滴滤池同步处理城市污水和臭气的建议。而且郭静等^[21]通过小试发现,生物滴滤池在处理臭气的同时也可有效处理营养液废水,证实该方法可行。

2.2.2 天然植物液除臭法

天然植物液除臭法的原理是将雾化的天然植物提取液均匀喷洒到异味气体中。液滴高效吸附恶臭分子并将其分解为无毒无味分子^[22]。该方法对 H_2S 、甲硫醇及三甲胺的去除率较高,具有无二次污染、廉价、科学、安全等特点^[23],无需安装臭气源密封、臭气收集及输送系统,适宜处理分散不易收集的臭气,但无法净化收集的废气,对低浓度、密闭空间内臭气具有广阔的应用前景^[24]。

张宇^[25]针对某污水提升泵站除臭工程占地面积小、投资少和除臭效率高的要求采用天然植物液除臭法,结果表明,系统运行时异味控制达到GB 14554—93和GB 18918—2002。上海竹园第一污水处理厂^[26]经方案比较采用天然植物液除臭法,主要污染物 H_2S 、 NH_3 达到厂界排放要求。李亮等^[27]研究了天然植物液用于处理具有分散臭气源的市政设

施,结果表明,除臭效率大于 70%。桐乡市污水处理厂^[28]通过除臭法比较,选择基建投资小、操作运行简单的天然植物液除臭法,污水除臭效率可达 96%以上,空间除臭效率可达 60%~90%。

2.2.3 高能离子除臭法

高能离子除臭法是运用电离在高能电场中产生大量 α 粒子,与氧碰撞生成强氧化性的正负氧离子,打开挥发性有机化合物(VOC)分子化学键,将其迅速分解为稳定无害小分子。同时,氧分子与空气中颗粒及尘埃碰撞,颗粒荷电聚合成较大颗粒物沉降下来。高能离子能有效降低空气中细菌浓度^[29]。高能离子除臭法是项新技术,设备占地小、运行管理方便、系统抗冲击能力强。

上海文庙泵站^[30]采用高能离子除臭法进行除臭,结果表明,该方法最大的优点是操作简单、去除率高、无二次污染、能耗小。高能离子除臭系统可根据室内污染物情况合理选择气流组织形式,确保除臭效果。天津海河工程地下排水泵站^[31]采用高能离子除臭法进行除臭,结果表明,整个系统设计合理、可靠性强,主要臭气净化指标均符合国家有关标准规定。杭州市高新区(滨江)2[#]、4[#]污水泵站^[32]经过分析比较,最终采用送风系统加外排系统的高能离子除臭流程,8 h 后 H_2S 、 NH_3 、 CH_4 及臭气浓度的去除率分别可达 98.3%、74.3%、66.1%和 77.4%。

2.2.4 活性氧化法

活性氧化法除臭原理是利用高压静电脉冲放电,将空气中氧电离成高密度、强氧化活性物质,高密度活性氧与恶臭污染物碰撞,将其氧化分解为低浓度、无机小分子。同时,氧被激发产生二次活性氧,进一步氧化有机物^[33]。该方法运行成本低、工艺简单、无明显二次污染,对低浓度高流速恶臭废气处理效果好,不少污水泵站采用此方法取得了较好效果。

大连老虎滩污水处理厂^{[33]62-64}、温江第二污水处理厂^[34]分别受其地理位置、占地面积和投资费用限制均采用活性氧化法对收集后臭气进行处理。结

果表明,该方法的设备具有体积小、质量轻、寿命长等优点,除臭效果可以达到国家标准。利用活性氧化法处理杭州滨江区污水处理厂^[35]、上海竹园第二污水处理厂^[36]的恶臭污染物,运行结果达到设计要求, H_2S 、 NH_3 、甲硫醇、臭气浓度的去除率分别在 80%、78%、79%、98% 以上,处理后气体符合 GB 14554—93。黄石市慈湖污水处理厂^[37]对收集的废气采用活性氧化法进行处理,测试结果表明,排放气体完全符合 GB 14554—93 中二级厂界标准。

2.2.5 联合法

由于恶臭成分复杂且嗅觉阈值低,就感官无味的要求而言治理难度大,多级净化成为理想的选择。目前,采用的联合法主要有生物-生物法、生物-洗涤法和吸附-氧化-吸附等^[38]。

郭静等^[39]研究了应用一体化生物脱臭,即生物滴滤与生物过滤有机组合起来。结果表明,该脱臭装置具有效率高、占地少、处理成本低等优点,在泵站恶臭防治上有良好的发展前景。南方某污水处理厂^[40]将均匀喷洒天然植物液除臭法和生物滤池法有机结合在一起,排放气体中主要污染物 H_2S 和 NH_3 均能达到 GB 14554—93 和 GB 18918—2002。这种联用在处理位于城市中心区的污水处理厂恶臭方面技术可行、经济合理,可达到预期效果。广州市猎德污水处理厂^[41]采用洗涤-生物滤床联合法对收集的臭气进行处理, NH_3 和 H_2S 的去除率分别大于 90%、99%,效果显著。ESTRADA 等^[42]研究了生物滴滤-活性炭吸附联合处理臭气,结果表明,对疏水性不同的各类臭气的除臭效率均可达 99%以上,社会效益较高。

2.3 除臭技术比较

实践表明,生物法、天然植物液除臭法、高能离子除臭法及活性氧化法均可达到理想的除臭效果,且能达到相应的排放标准。目前,这 4 种除臭技术在工程中均有使用,但要依据它们各自的适用范围及优缺点(如表 1 所示)在具体的工程中选择合适的技术。

表 1 4 种除臭技术的比较
Table 1 Comparison of 4 deodorization methods

除臭技术	适用范围	除臭效果	占地面积	二次污染	投资	运行操作	能耗
生物法	适于处理中低浓度生物可降解臭气,耐冲击负荷差,影响因素较多	良好	大	少	大	运行复杂费用低,不可间歇运行	很小
天然植物液除臭法	适宜处理低浓度、密闭空间内臭气,对处理的废气具有针对性,不宜处理净化收集的废气	良好	小	无	小	运行简单费用高,可间歇运行	小
高能离子除臭法	适于处理中高浓度、气量大的废气,抗冲击负荷能力高	稳定、良好	小	无	小	运行简单费用低,可间歇运行	很小
活性氧化法	适于处理中低浓度、高流速的废气	稳定、优良	小	无	高	运行简单费用低,可间歇运行	小

3 除臭新技术研究应用

近年来,除臭技术研究引起关注。低温等离子体法和纳米材料净化法是当前的研究热点。利用等离子体处理各种废气的优势在实验室已得到充分证明。纳米 TiO_2 已用于环境中多个领域,但中国该技术大部分停留在实验室阶段。此外,现行除臭技术的逐步完善也是今后恶臭治理技术的方向。

3.1 低温等离子体法

利用低温等离子体处理恶臭气体是项新技术。等离子体^[43]是由电子、离子、自由基和中性粒子组成的导电性流体,整体呈电中性。除臭原理是通过高压脉冲电晕放电,在常温常压下获得非平衡等离子体,即大量高能电子和 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等活性粒子,把恶臭污染物氧化降解为无害或危害小的物质。低温等离子体法在国外已被应用于治理 VOC 废气、烟气脱硫、降解氟利昂类物质等研究,具有处理效率高、能耗低、适用广、无二次污染等特点,在国内应用实例较少^[44]。

在恶臭治理方面, RUAN 等^[45]用脉冲电晕放电反应器处理 2 组恶臭气体混合物($200\text{ mg/m}^3\text{ C}_2\text{H}_5\text{SH}+200\text{ mg/m}^3\text{ H}_2\text{S}$ 和 $105\text{ mg/m}^3\text{ C}_2\text{H}_5\text{SH}+40\text{ mg/m}^3\text{ NH}_3$), 前者的去除率分别为 95.6% 和约 100%, 后者分别为 93.1% 和约 100%。王建明等^[46]采用介质阻挡放电法处理臭气, 结果表明, 8 h 后 H_2S 、 NH_3 和臭气浓度去除率分别为 91.1%、93.4% 及 93.6%。文献[44]通过工程应用和试验研究表明, 一定范围内增加低温等离子体除臭设备电源电压、频率和停留时间可提高降解效率。低温等离子体法在污水处理厂^[47-49]的运行结果表明, 该方法对 H_2S 、 NH_3 、 CH_4 的去除率分别达到 81.3%、88.1%、84.4%, 可达到相应的国家标准。

3.2 纳米材料净化法

光催化技术作为一种新兴环境净化技术, 已得到较快发展。高端紫外光除臭设备的原理是当用特定波长紫外光照射半导体光催化剂时, 产生具有强氧化性的价带空穴, 将恶臭分子氧化分解。 TiO_2 以其活性高、稳定性好、抗腐蚀等优势成为备受关注的光催化剂。利用纳米 TiO_2 光催化技术净化室内空气、灭菌除臭、降解有机污水等, 已取得了很好的效果。

广东某污水处理厂^[50]采用自制紫外光催化氧化(UVCY)设备处理恶臭气体, 结果表明, 该设备处理后的恶臭污染物都可达标排放, 具有除臭效率高、

占地少、投资省等优势。纳米 TiO_2 应用广泛, 但由于其电子-空穴易复合、导带宽度窄等原因, 其光催化活性有待提高。研究发现, 可通过负载化、掺杂过渡金属元素、表面处理等提高 TiO_2 的光催化活性。程大莉等^[51]利用竹炭负载 TiO_2 光催化降解苯酚, 降解速率明显提高。段晓东等^[52]研究表明, 在 TiO_2 中加入 0.05% (质量分数) Fe 可将其催化活性提高 1.36 倍。鞠剑峰等^[53]通过实验表明, 纳米 $\text{ZnO-TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合体在阳光下可有效降解废水。

4 除臭技术研究展望

生物法对处理高浓度、超大气量恶臭的能力有限。由于影响生物反应器因素较多, 实际中要针对恶臭污染物类型选择合适的菌种和工艺条件, 保持微生物的高活性。针对生物法的特点, 高效除菌剂的研发、废气生物处理的动力学研究以及经济高效新型填料的研究都是其重要的研究方向。郭金姝等^[54]设计了处理污水恶臭的生物过滤池装置, 以 H_2S 为对象针对不同进气量确定最佳工况点, 研究最佳工况点下不同填料高度的除臭效率, 为经济合理设计污水除臭设备提供实验依据。

高能离子除臭法在实际运行中, 除臭效果欠佳。原因是臭气经高能离子净化器后直接排放, 两者反应时间短, 高能离子衰减速率快, 与恶臭分子反应的高能离子数量远少于产生的离子数量。因此, 延长高能离子与恶臭分子反应时间、减缓高能离子衰减速率、提高除臭效率是高能离子除臭法进一步研究的重点。另外, 系统使用寿命不长, 更换导致成本较高, 需探索更加经济可行的方法^[55]。

5 结 语

污水恶臭污染已严重影响大气环境质量和人类健康, 除臭成为大势所趋。许多城市污水处理设施在实际中已采用适当的除臭技术控制恶臭污染。通过对现行除臭技术的分析发现, 除臭系统可有效治理恶臭, 臭气排放浓度可达到国家有关标准。常用除臭技术较多, 其中生物法应用最广, 其次是活性氧化法、天然植物液除臭法、高能离子除臭法。少数污水处理厂采用催化型活性炭吸附也有良好的效果, 它也可作为其他除臭技术的后续处理, 保证处理效果。

目前, 中国除臭技术研究主要集中在现有技术

完善和新技术探索。低温等离子体法和纳米材料净化法是当前研究热点。开发高效新型填料及除菌剂、改进植物液雾化方式、减少高能离子衰减、提高催化剂活性、多种技术联用等是除臭技术的重要研究方向。因此,实际选择除臭技术时要综合考虑各种因素,力求达到环境、经济和社会效益并重。

参考文献:

- [1] GB 14554—93,恶臭污染物排放标准[S].
- [2] 王建明,袁武建,陈清,等.污水处理系统除臭技术综述[J]. 能源环境保护,2005,19(5):5-8.
- [3] 郭静,梁娟,匡颖,等.污水处理厂恶臭污染状况分析与评价[J]. 中国给水排水,2002,18(2):41-42.
- [4] GOSTELOW P, PARSON S A. Sewage treatment works odour measurement[J]. Wat. Sci. Tech., 2000, 41(6):33-40.
- [5] 蒋岚岚,沈晓玲.污水处理厂除臭工艺选择及工程设计[J]. 环境污染与防治,2007,29(10):781-784.
- [6] 徐丽萍.污水厂、泵站臭气治理技术应用评析[J]. 环境科学与管理,2009,34(1):98-103.
- [7] 罗振家.城市排水设施中恶臭源的产生及其治理对策的研究[J]. 中国市政工程,2003(3):50-57.
- [8] 芮旭东.曝气池除臭加盖技术在城市污水厂的应用[J]. 中国给水排水,2011,27(4):86-89.
- [9] WOERTZ J R, VAN HEININGEN W N M, VAN EEKERT M H A, et al. Dynamic bioreactor operation: effects of packing material and mite predation on toluene removal from off gas[J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2002, 58(5):690-694.
- [10] FORTUNY M, BAEZA J A, GAMISANS X, et al. Biological sweetening of energy gases mimics in bio trickling filters[J]. Chemosphere, 2008, 71(1):10-17.
- [11] 李慧丽,张建新,张荣兵,等.污水厂生物除臭设施运行及影响因素的研究[J]. 环境工程学报,2007,1(5):25-30.
- [12] 席劲琰,胡洪普,罗彬,等.不同填料生物滤塔净化城市污水厂恶臭气体研究[J]. 中国给水排水,2010,26(3):1-3.
- [13] 王明健,李歆.污水厂生物过滤除臭工艺及工程设计[J]. 中国给水排水,2009,25(16):32-35.
- [14] 刘建伟,马文林,黄力华.城市污水处理厂除臭生物滤池运行效果及影响因素研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(12):4-8.
- [15] 陈贻龙,隋军,汪传新,等.生物除臭在污水处理厂的应用[J]. 中国市政工程,2004(3):48-50.
- [16] 王令凡,蒋国津.生物滴滤床技术用于市政污水泵站除臭[J]. 中国给水排水,2009,25(1):73-76.
- [17] BRAM S, DARIELA N C, GERMAN A, et al. Inoculation and start-up of a bio trickling filter removing dimethyl sulfide[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 113(2/3):127-134.
- [18] 周炜煌,陈凡植,祝光,等. H_2S 、 NH_3 混合臭气在生物滴滤池中的净化研究[J]. 工业安全与保护,2006,33(3):13-16.
- [19] 睦光华,黄锦勇.生物滴滤床除臭系统净化污水处理厂臭气的研究[J]. 广东化工,2010,37(6):189-190.
- [20] 李桂荣,方虎,周荣敏,等.生物滴滤池处理污水与臭气的研究进展[J]. 中国给水排水,2009,25(20):18-20.
- [21] 郭静,匡颖,王召,等.复合床生物反应器处理恶臭气体和污水[J]. 中国给水排水,2001,17(9):11-13.
- [22] 齐芸.除臭工艺在市政排水工程中的应用与研究[J]. 中国市政工程,2006(4):57-58.
- [23] 袁为岭,黄传荣.植物提取液处理臭气的研究进展[J]. 化工环保,2005,25(6):441-445.
- [24] 解清芳,吴荣芳,赵如今,等.国内植物提取液除臭剂的开发及其在污水厂的应用[J]. 安徽农业科学,2008,36(23):10161-10163.
- [25] 张宇.市政污水除臭方法的选择及应用实例[J]. 中国市政工程,2008(4):56-57.
- [26] 卢文程,徐灿华,李天琪,等.竹园第一污水处理厂除臭工程设计[J]. 中国给水排水,2007,23(16):46-48.
- [27] 李亮,张明杰,阳佳中,等.新型天然植物提取液除臭工艺[J]. 西南给水排水,2007,29(5):6-9.
- [28] 李国光,沈松.几种污水处理系统除臭工艺比较分析[J]. 山西建筑,2009,35(3):200-201.
- [29] 杨春梅.浅谈城市污水处理厂除臭技术的经验[J]. 科技创新导报,2009(14):124.
- [30] 叶文庆.污水泵站应用 BENTAX 空气污染离子净化系统除臭[J]. 城市道桥与防洪,2009(8):96-98.
- [31] 马旭东,耿秀顺.除臭技术在海河工程地下排水泵站中的应用[J]. 施工技术,2009,38(S1):550-552.
- [32] 邓铭庭,周尚春,郭毅.高能离子净化系统用于污水泵站除臭[J]. 中国给水排水,2004,20(10):103-104.
- [33] 刘东海,孙宏飞.活性氧除臭技术在大连老虎滩污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水,2007,23(12).
- [34] 田华蕊.离子氧除臭技术在温江第二污水处理厂中的应用[J]. 西南给排水,2010,32(1):5-6.
- [35] 王建明,袁武建,陈刚,等.污水处理厂恶臭污染物控制技术的研究[J]. 安全环境与工程,2005,12(3):33-38.
- [36] 白海龙,马小杰,章曦.上海竹园第二污水处理厂除臭工程设计[J]. 中国市政工程,2009(6):38-40.
- [37] 李国洪.活性氧离子除臭技术在黄石市慈湖污水处理厂中的应用[J]. 科技传播,2010(19):123.
- [38] 田长顺.城市污水厂恶臭治理方法及发展趋势[J]. 有色金属科学与工程,2011,2(1):87-91.
- [39] 郭静,朱珂,刘学欣,等.应用一体化生物脱臭装置净化污水泵站臭气研究[J]. 环境卫生工程,2004,12(4):220-222.
- [40] 张剑,曾凡勇,谢海波,等.南方某污水处理厂的除臭技术探讨[J]. 市政技术,2009,27(1):65-67.
- [41] 李亮,赵中富,张明杰,等.猎德污水处理厂污泥系统除臭工程设计[J]. 给水排水,2007,33(12):40-43.
- [42] ESTRADA J M, BART KRAAKMAN N J R, MUÑOZ R, et al. A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants[J]. Environ. Sci. Technol., 2011, 45(3):1100-1106.
- [43] RUAN Jianjun, LI Wei, SHI Yao, et al. Decomposition of simulated odors in municipal wastewater treatment plants by a wire-plate pulse corona reactor[J]. Chemosphere, 2004, 59(3):327-333.

(下转第 99 页)