# 生物技术去除氨氮废水研究进展

# 周雨婷

(重庆工商大学 环境与资源学院 重庆 400067)

摘 要: 阐述了微生物和植物对废水中氨氮的去除研究现状,分别介绍了传统的硝化/反硝化技术、单种微生物以及组合微生物对废水中氨氮的处理。同时介绍了水葫芦和藻类对废水中氨氮的去除情况,并展望了微生物和植物修复技术在废水中氨氮去除方面的未来研究方向。

关键词: 微生物; 植物; 氨氮

中图分类号: TO 033; X 703.1; Q 89 文献标识码: A 文章编号: 1671 - 3206(2019) 11 - 2768 - 05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20190920.014

# Research progress in biotechnology to remove ammonia nitrogen wastewater

# ZHOU Yu-ting

( College of Environment and Resources Chongqing Technology and Business University Chongqing 400067 China)

**Abstract**: Described the research status of microbial and plant removal of ammonia nitrogen in wastewater. It introduces traditional nitrification/denitrification technology single microorganism and combined microorganisms to treat ammonia nitrogen in wastewater and introduces water hyacinth and algae to ammonia nitrogen in wastewater. The removal situation and prospects for future research on microbial and phytoremediation technologies for ammonia nitrogen removal in wastewater.

Key words: microorganism; plant; ammonia nitrogen

氨氮作为废水中一种重要的常见氮 在农业、生活和工业废水中普遍存在<sup>[1]</sup>。值得注意的是 ,与其他氮形式(即硝酸盐和亚硝酸盐) 相比 ,某些废水源的氨氮含量高得多 ,为防止富营养化 ,氨氮的处理至关重要<sup>[2-3]</sup>。

目前 脱氮技术可分为物理、化学与生物脱氮技术 ,Gupta 等<sup>[4]</sup> 认为 ,离子交换、生物技术和吸附是 氨氮废水处理中研究最频繁的技术之一。对于传统 的物理化学脱氮技术在生产、操作和维护方面都是 昂贵的 ,因为它们需要化学试剂或补充设施<sup>[5]</sup> 。本文就生物技术(微生物处理技术和植物修复技术)处理氨氮废水热点问题展开综述 ,并展望未来生物技术处理氨氮废水的研究方向。

## 1 微生物处理技术

微生物处理技术是利用氨还原菌进行废水中氨去除,对于自然界中天然存在的细菌,具有费用低廉、来源广泛且效果明显优于其它技术的特点 $^{[6]}$ 。氨还原细菌分为好氧氨氧化菌及厌氧氨氧化菌 $^{[7]}$ 。好氧氨氧化菌以 $_{2}$ 作为电子受体,将氨还原为硝酸

盐 硝酸盐则通过等效的外源电子受体(如甲醇)被还原为  $N_2$ ,而厌氧氨氧化菌需在厌氧的条件下进行,可直接以硝酸盐作为电子供体 将氨还原为  $N_2$ 。其反应机理如下:

好氧氨氧化菌反应机理:

$$\begin{aligned} & NH_{4}^{+} + 1.5O_{2} \rightarrow NO_{2}^{-} + 2H^{+} + H_{2}O \\ & NH_{4}^{+} + N_{2}O_{4} \rightarrow \\ & 0.33NO_{2}^{-} + 1.33H^{+} + 0.33N_{2} + 2NO + 1.33H_{2}O \\ & NO_{2}^{-} + 0.5O_{2} \rightarrow NO_{3}^{-} \\ & NO_{3}^{-} + H^{+} + 5[H] \rightarrow 0.5N_{2} + 3H_{2}O \end{aligned}$$

厌氧氨氧化菌反应机理:

....

 $NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow 2N_2 + H_2O$ 

#### 1.1 传统的硝化/反硝化技术

Koren 等<sup>[8]</sup>针对氨去除工艺进行了两阶段生物 硝化/反硝化的可行性研究 ,该研究比较了滴滤池和连续搅拌塔反应器( CASR) 在硝化第一阶段的有效性 结果表明 CASR 工艺相对于滴滤池工艺 ,对于氨氮的去除率高 3 倍 ,同时 ,CASR 的硝化过程与反硝化过程结合后 ,在初始浓度为 400 mg/L 的条件下 ,

收稿日期: 2019-03-05 修改稿日期: 2019-03-28 基金项目: 重庆市科委基金(cstc2014yykfA20003)

作者简介: 周雨婷(1995 -) ,女 重庆人,重庆工商大学在读硕士研究生,师从钟成华教授,从事水处理方面的研究。电话: 18883176212 ,E - mail: 1558144388@ qq. com

氨去除率可达 90%。

Mook 等<sup>[9]</sup>分别使用物理化学和生物技术处理 水产养殖废水中的总氨氮和硝酸盐,该研究观察到 生物处理可能是一个很好的选择,因为它的效率高, 设备尺寸小,副产物(污泥)最少。

滴滤器由固定介质床和预过滤的废水组成。在有氧生物膜上向下流动。滴滤器的关键参数是过滤介质。Lekang 等[10]使用 4 种不同类型的过滤介质进行了研究。这些过滤介质由 Finturf 人造草、Norton环、Kaldnes 环和 Leca 柱(2~10 mm)组成,用于处理 1.5 mg的 TAN-N/L。在 Leca 柱中脱氮率最高,因为其具有更大的表面积和更长的柱停留时间。

流化床反应器作为面临堵塞问题的系统的替代反应器之一 粒度决定着流化床反应器的处理效率。Davidson等[11]进行了两种不同砂粒(0.11 mm 和0.19 mm)的实验研究,以去除废水中的总氨氮(TAN)、含碳生化需氧量(cBOD)和总悬浮固体(TSS),研究结果表明,当粒径为0.11 mm 时,具有更高的TAN去除率。

Cheballah 等<sup>[12]</sup> 进行了滴滤器、流化床反应器和筛网过滤器组合的反应器去除 TAN 的有效性研究 结果表明 TAN 去除率约为65.21%。但是 这种类型的反应器需要一个额外的曝气系统,以启动该处理程序。

# 1.2 单种微生物处理技术

Sabumon [13] 进行了厌氧氨氧化菌去除氨氮的有效性研究 结果表明在有机物存在的情况下氨去除可行 同时 ,该研究发现在所有参与反应的无机电子受体中 , $NO_2^-$  是  $NO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$  中最有效的。当 pH = 6 ~ 8、初始浓度为 100~mg/L 时 ,氨去除率可达  $80\%~\sim90\%$ 。

Yang 等<sup>[14]</sup>将氨氧化菌在培养基中培养 7 d 后,微生物和碳酸钙粉形成一个菌团 SEM 和 TEM 表征说明,该氨氧化菌团主要由杆状、球形和丝状细菌附着在碳酸钙粉体表面生长,并相互缠绕形成。该氨氧化菌团能有效去除氨氮,当初始氨浓度为(262.28  $\pm 8.21$ ) mg/L 时 经过 10 d 的培养,氨氮去除率为(99.6  $\pm$ 0.2)%,其中分别有(13.84  $\pm$ 0.44)%和(32.0  $\pm$ 1.01)%的氨氮转换为生物质和氨氧化产物( $NO_2^--N$ )和  $NO_3^--N$ )。

Nakano 等<sup>[15]</sup>利用培养的氨氧化菌团 ,在 ANA3 培养基(含有相同浓度 ,即 56 mg/L 的  $NH_4^+$ -N 和  $NO_3^-$ -N) 中培养 37 d ,大约去除 90% 的氨氮。Erna 等<sup>[16]</sup>使用氨氧化菌团 M1 进行氨氮去除 ,结果表明 当氨初始浓度为(2.17 ± 0.10) mg/L 时 ,经过 14 d 的培养 ,氨去除率为 97.24%。

Yun 等 $^{[17]}$  从养殖废水中直接筛选培养异养单胞菌株 LPN080 去除水样中的氨氮 ,在水样中加入氨氮和葡萄糖 ,当以氨氮作为唯一氮源时 ,氨氮在48 h 内从最初的 8 mg/L 降至 0.3 mg/L ,氨氮去除率达 96%。

光和细菌(PSB) 处理高氮浓度废水具有极大优势,有研究表明光合细菌可处理含氮浓度为 1 ~ 2 300 mg/L的污水,同时,在没有前处理的情况下,可处理氨氮浓度为 2 300 mg/L 的废水<sup>[18]</sup>。尽管PSB 生物转化在处理高氮废水和培养富蛋白细胞方面显示出了巨大的潜力,但这一领域的研究还不够。以往的研究主要集中在去除效率和蛋白质含量方面<sup>[19]</sup>。

一些研究已经报道了光合细菌对于处理高氨度水中的氮具有巨大的潜力。Zhou等<sup>[20]</sup>研究发现光合细菌在含氨浓度为 7 000 mg/L 的鸡粪废水中存活良好,且氨去除率可达 83.2%。同时,Yang等<sup>[21]</sup>表明在低碳氮比、高氨的沼液废水中可得到99.75%的氨去除效率。

光氧条件、微生物种类和群落多样性决定着 PSB 废水脱氮效果。 Yang 等<sup>[22]</sup>研究了高氨废水中 PSB 处理时光氧条件和微生物群落对其的影响。结果表明 ,PSB 在光氧条件下样品的优势属为单胞菌 (占 58. 23%) 此时生物量最高 ,且 COD、NH<sub>4</sub> -N 和 NO<sub>3</sub> -N 去除效率最高。

#### 1.3 组合微生物处理技术

Yang 等  $^{[23]}$  采用生物滤池耦合硝化 + 厌氧氨氧化共同作用去除  $^{Fe}$  、 $^{Mn}$  和氨氮,该研究根据时间将反应阶段分为  $^{I}$  →  $^{VIII}$  阶段,结果表明,在  $^{I}$  →  $^{VII}$  阶段,氨氮可有效转换,最高转换率可达  $^{98}$ %。 DO 对硝化反应和厌氧氨氧化反应均有影响,同时根据废水处理研究报道,高浓度的氨会抑制  $^{ANAMMOX}$  反应过程,半抑制浓度为  $^{770}$  mg/ $^{L}$  。游离态的氨被证明是主要的抑制剂,而不是氨盐  $^{[25]}$ 。

Ge 等<sup>[26]</sup>通过驯化淡水硝化-厌氧氨氧化污泥(SNAP)以去除高盐和超盐废水中的氮,通过观察微生物活性和微生物群落情况,以了解 SNAP 工艺在不同盐度下对氨氮的去除效果。结果表明,SNAP系统经强化曝气后,经逐步适应,可处理含盐(3%)、富氨(185 mg/L)废水。高盐度(5%)严重抑制 anammox 活性,导致 SNAP系统最终恶化。Oshiki等<sup>[27]</sup>也发现3%的盐度对 anammox 活性无明显干扰,可维持70%的 anammox 活性。

#### 2 植物修复技术

Kösesakal 等<sup>[28]</sup>认为植物修复即使用植物和根际微生物的作用将土壤、沉积物、地下水、地表水、大

气中的污染物去除的过程。Placek 等<sup>[29]</sup> 将植物修复描述为利用植物和相关微生物来固定(植物稳定)、移除(植物提取)和蒸发或从土壤和水环境中降解污染物的过程。

Lu 等<sup>[30]</sup>认为,水生植物修复系统的操作包括三个原则: ①高效水生植物系统的识别和实施; ②植物对氮、磷、金属等溶解营养物的吸收; ③对修复系统产生的植物生物量进行收获和有益利用。

和传统方法相比,植物修复由于其使用天然植物代替高昂的化学药剂去除污水中的氮而广为人知。植物修复具有低运行成本、高社会接受度、易于操作和维护、对环境友好、利于可持续发展、适用于大面积污染区域、植物在高浓度危险废物下的存活率高于微生物、防止侵蚀和浸出、避免有毒物质或污染物扩散到周围地区的优势,但使用植物修复也存在过程缓慢、不适用于污染严重的区域、受环境(如极端 pH 值、盐度、污染物浓度、其他毒素的存在)的影响、生物质处理问题(如工厂涉及重金属的吸收,则须考虑回收金属)、需要大面积的修复、污染物减排水平不达标等不足。

一般来说,去除污染物的植物修复机制有5种(植物挥发、植物降解、植物萃取、根瘤菌过滤和植物稳定)<sup>[31-32]</sup>。植物挥发是指化合物从植物叶片中提取并以气态形式释放到大气中。植物降解是植物根际或植物内部与相关微生物共同作用,从而将有机污染物转化为无毒形式的过程。同时,植物萃取是植物从环境中吸收物质(如有机化合物),然后在植物细胞内进行隔离的自然能力。根瘤菌过滤是指植物根系表面或其他部位对污染物的吸附或沉淀。最后植物稳定化是通过植物释放的污染物和化学物质的结合而使周围环境中的化合物固定化。具体的修复机制详见表1。

表 1 不同污染物的植物修复机理

Table 1 Phytoremediation mechanism of different pollutant

污染物类型	机理
有机物	植物提取: 直接吸收和积累及代谢植物组织中 的有机物
	植物挥发: 通过叶片蒸腾挥发性有机化合物 ( VOC)
	根际生物修复:释放分泌物,能刺激土壤微生物进行活动和生化转化
	植物转化:在根-土界面将矿化强化为相对无毒的成分,如二氧化碳、硝酸盐、氯和氨
氮	生物作用: 氨化、硝化、反硝化、植物吸收等作用物理化学作用: 氨挥发、吸附
金属	植物提取: 吸收和回收污染物到地上 根瘤菌过滤: 将水中的金属过滤到根系中 植物挥发: 金属离子转化为挥发态
放射性核素	植物同化 植物根部的放射性核素的悬浮物质的沉降作用

#### 2.1 水葫芦修复废水的研究

Rezania 等报道,水葫芦在水面的覆盖会阻止阳 光和氧气通过水面的渗透,从而阻碍水下水生植物 光合作用产生氧气来支持水生生物。因此,控制水 葫芦的生长对防止水葫芦的危害是十分重要的,可 使用机械、化学和生物的方法控制水葫芦的生 长[33-34]。除了不环保和不具成本效益外,由于仍不 可能将整个水葫芦物种从水体中清除,因此取得的 成效有限 与其寻找消灭水葫芦的方法 不如利用水 葫芦做对社会和环境有益的事情。例如 利用水葫 芦清除生活和工业废水中的各种污染物[35]。20世 纪70年代初 植物修复技术在废水处理中的应用处 于起步阶段,水葫芦被报道作为去除不同类型污水 的植物、例如消化糖厂废料、奶牛场、棕榈油生产、酿 酒厂、制革、制浆造纸、农药生产及重金属等[36]。20 世纪80年代 相关方面的研究没有多大进展 但21 世纪之后 水葫芦作为各种废水中有机或无机污染 物去除被广泛研究。

刘立岩等<sup>[37]</sup>使用水葫芦对水库中的氮、磷进行处理 其研究结果表明,水葫芦的根部可有效地吸收氮和磷,2 d内可去除氮磷80%和40%。贺丽虹等<sup>[38]</sup>分别进行了水葫芦在三类水(重污染水、中度污染水与轻度污染水)中的氮磷去除研究,结果表明经过4周的修复,水葫芦对氮、磷的总去除率分别为80.37%和79.47%81.97%和81.53%82.78%和82.05%。水葫芦可有效去除总氮和氨氮,丁爱芳等<sup>[39]</sup>使用水葫芦去除富营养化水体中的总氮、氨氮和总有机氮 经过28 d的培养 其结果表明该方法对总氮、氨氮和总有机氮的去除率分别为87.3%,95.7%和52.4%~65.8%之间。

Anandha [40] 进行了实验室规模的 24 d 的植物修复过程,其结果表明水葫芦能去除生活污水中67%的氨氮。陈松 [41] 在实验缸中采用水葫芦对氨氮进行静态实验结果表明,对氨氮的去除率为86.44%~93.32%。同时进行动态实验结果表明,流动水体可增加水中的含氧量,同时促进水中微生物繁殖,根据调查,在水体中存在丛毛单胞菌科等细菌,具有分解蛋白质和摄取酸性物质的能力,也与水葫芦生长有着密不可分的联系。水葫芦的大规模应用主要集中在富营养化湖泊和污染河流的治理上,涉及到长期的修复过程。如 Wang等[42] 在湖泊面积 10.5 km²,覆盖 4.3 km²,水葫芦的富营养化湖泊进行了7个月的植物修复,修复效果为 0.02~4.7 mg/L。

#### 2.2 藻类修复废水的研究

氨毒性是微藻生长的一个主要缺点 ,尤其是如

猪场废水等高强度氨废水。氨浓度、碳氮比、pH值对小球藻中的氨毒性和营养物去除有着重要影响。研究人员发现,以生物柴油甘油为碳源,调节其碳氮比,可大大提高微藻生物量的生产和废水处理效率<sup>[43]</sup>。将不同碳氮比的废水混合后,利用普通小球藻去除猪场废水中的营养成分,成功地调节了猪场废水的碳氮比<sup>[44]</sup>。Zheng等<sup>[45]</sup>发现微藻生长最好的碳/氮比为25:1。最大生物量浓度为3.83 g/L,最高的细胞生存能力为97%,可去除氨100%、磷95%及化学需氧量99%,通过控制pH值,氨的毒性减轻。

Park 等<sup>[46]</sup>使用绿藻栅藻去除氨氮 研究藻类生长抑制情况(种子细胞浓度、碱度以及曝气的影响) 结果表明曝气对氨的去除影响更大 发现在曝气后氨的去除量每天可达 6.3~66.8 mg/L 增加了10 倍。

# 3 结论与展望

相对于传统的物理化学脱氮技术,生物修复技术具有运行成本低、处理效率高等显著优点。微生物处理技术近年来受到学者的广泛关注,厌氧氨氧化菌以及光合细菌对于氨氮废水具有很好的去除效能,目前对于高盐度废水中氨去除的研究相对较少,对于组合处理技术处理氨氮废水,效果明显,但从经济角度出发,需要对其进行进一步的研究。

慢速是植物修复技术的主要缺点,但考虑到处理过程的低运行成本和可持续性,慢速仍然被认为是较好的解决方案。在各种大型植物中,水葫芦比其他大型植物吸收氮量大,被推荐用于富氮废水的治理。藻类也被用来处理氨氮废水,对于水葫芦和藻类的生存来说,浓度仍然有一个耐受限度。浓度过高会导致植物产生氨毒性,进而导致植物死亡。近年来,水葫芦在富含氨氮水体修复中的实际应用主要集中在生活污水、富营养化湖泊和河水等方面。水葫芦在处理工业废水中含量丰富的应用较少,未来有可能探索并进行先进技术的开发。

#### 参考文献:

- [1] Breisha G Z ,Winter J. Bio-removal of nitrogen from was-tewaters—— a review [J]. Am J Sci 2010(6):508-528.
- [2] Sooknah R D ,Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecol Eng ,2004 ,22 (1):27-42.
- [3] Tiwari K K ,Dwivedi S ,Mishra S ,et al. Phytoremediation efficiency of portulaca tuberosa rox and *Portulaca oleracea* L. naturally growing in an industrial effluent irrigated area

- in Vadodra Gujrat [J]. India , Environ Monit Assess , 2008 ,147: 15-22.
- [4] Gupta V K Sadegh H Yari M et al. Removal of ammonium ions from wastewater: a short review in development of efficient methods [J]. Glob J Environ Sci Manage ,2015 (1):149-158.
- [5] Bohutskyi P Liu K Nasr L K et al. Bioprospecting of microalgae for integrated biomass production and phytoremediation of unsterilized wastewater and anaerobic digestion centrate [J]. Appl Microbiol Biotechnol ,2015 ,99 (14): 6139-6154.
- [6] Crab R Avnimelech Y Defoirdt T et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production [J]. Aquaculture 2007 270(1/2/3/4):1-14.
- [7] Schmidt I "Sliekers O "Schmid M "et al. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater [J]. FEMS Microbiol Rev ,2003 ,27 (4): 481-492.
- [8] Koren D W ,Gould W D ,Bédard P. Biological removal of ammonia and nitrate from simulated mine and mill effluents [J]. Hydrometallurgy 2000 56(2):127-144.
- [9] Mook W Chakrabarti M Aroua M et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN) ,nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: a review [J]. Desalination ,2012 , 285: 1-13.
- [10] Lekang O I Kleppe H. Efficiency of nitrification in trick—ling filters using different filter media [J]. Aquac Eng , 2000 21(3):181-199.
- [11] Davidson J ,Helwig N ,Summerfelt S T. Fluidized sand biofilters used to remove ammonia ,biochemical oxygen demand ,total coliform bacteria ,and suspended solids from an intensive aquaculture effluent [J]. Aquac Eng , 2008 ,39(1):6-15.
- [12] Cheballah K Sahmoune A Messaoudi K et al. Simultaneous removal of hexavalent chromium and COD from industrial wastewater by bipolar electrocoagulation [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2015 96:94-99.
- [13] Sabumon P C. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter: a novel route [J]. J Hazard Mater 2007, 149(1): 49-59.
- [14] Yang Xiaolong ,Liu Lihua ,Wang Shoubing. A strategy of high-efficient nitrogen removal by an ammonia-oxidizing bacterium consortium [J]. Bioresource Technology 2019 , 275: 216-224.
- [15] Nakano M Shimizu Y ,Okumura H ,et al. Construction of aconsortium comprising ammonia-oxidizing bacteria and denitrifying bacteria isolated from marine sediment [J]. Biocontrol Sci 2008 ,13(3):73-89.
- [16] Erna N M Banerjee S Shariff M et al. Screening identifi-

- cation and immobilization of ammonia oxidizing bacterial consortium collected from mangrove areas and shrimp-farms [J]. Asian J Anim Vet Adv 2013 8(1):73-81.
- [17] Yun Long Yu Zonghe Li Yinyin et al. Ammonia nitrogen and nitrite removal by a heterotrophic Sphingomonas sp. strain LPN080 and its potential application in aquaculture [J]. Aquaculture 2019 500: 477-484.
- [18] Idi A ,Ibrahim Z ,Mohamad S E ,et al. Biokinetics of nitrogen removal at high concentrations by Rhodobacter sphaeroides ADZ101 [J]. Int Biodeterior Biodegrad , 2015 ,105: 245-251.
- [19] Hülsen T ,Hsieh K ,Lu Y ,et al. Simultaneous treatment and single cell protein production from agri-industrial wastewaters using purple phototrophic bacteria or microal—gae——a comparison [J]. Bioresour Technol 2018 254: 214-223.
- [20] Zhou Q Zhang G Zheng X ,et al. Biological treatment of high NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N wastewater using an ammonia-tolerant photosynthetic bacteria strain (ISASWR2014) [J]. Chin J Chem Eng 2015 23: 1712-1715.
- [21] Yang Anqi ,Peng Meng ,Zhang Guangming ,et al. Effects of light-oxygen conditions on microbial community of photosynthetic bacteria during treating high-ammonia wastewater [J]. Process Biochemistry 2018 72: 137-142.
- [22] Yang A Zhang G ,Yang G ,et al. Denitrification of aging biogas slurry from livestock farm by photosynthetic bacteria [J]. Bioresour Technol 2017 232:408-411.
- [23] Yang Hang ,Li Dong ,Zeng Huiping ,et al. Impact of Mn and ammonia on nitrogen conversion in biofilter coupling nitrification and ANAMMOX that simultaneously removes Fe ,Mn and ammonia [J]. Science of the Total Environment 2019 ,648: 955-961.
- [24] Jin R C ,Yang G F ,Yu J J ,et al. The inhibition of the Anammox process: a review [J]. Chem Eng J ,2012 ,197: 67-79.
- [25] Dapena-Mora A ,Fernandez I ,Campos J L ,et al. Evaluation of activity and inhibition effects on Anammox process by batch tests based on the nitrogen gas production [J]. Enzym Microb Technol 2007 A0(4):859-865.
- [26] Ge Chenghao ,Dong Ying ,Li Hongmin ,et al. Nitritation—anammox process——A realizable and satisfactory way to remove nitrogen from high saline wastewater [J]. Biore—source Technology 2019 275: 86-93.
- [27] Oshiki M ,Shimokawa M ,Fujii N ,et al. Physiological characteristics of the anaerobic ammonium-oxidizing bacterium 'Candidatus Brocadia sinica' [J]. Microbiology , 2011 ,157(6):1706-1713.
- [28] Kösesakal T ,Ünal M ,Kulen O ,et al. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons by using a freshwater fern species Azolla filiculoides Lam [J]. Int J Phytoremediation 2016 , 18: 467-476.

- [29] Placek A ,Grobelak A ,Kacprzak M. Improving the phytoremediation of heavymetals contaminated soil by use of sewage sludge [J]. Int J Phytoremediation ,2016 ,18:
- [30] Lu Q Zhenli L H ,Donald A G ,et al. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce *Pistia stratiotes* L. [J]. Environ Sci Pollut Res 2008 ,17: 84-96.
- [31] Gomes H I. Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities [J]. Environ Technol Rev ,2012 (1): 59-66.
- [32] Paz-Alberto A M ,Sigua G C. Phytoremediation a green technology to remove environmental pollutants [J]. AJCC , 2013(2):71-86.
- [33] Rai P K Singh M M. Eichhornia crasssipes as a potential phytoremediation agen and an important bioresource for Asia Pacific region [J]. Environ Skept Crit ,2016 (5): 12-19
- [34] Vymazal J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 724-751.
- [35] Mayo A W ,Hanai E E. Modeling phytoremediation of nitrogen-polluted water using water hyacinth ( *Eichhornia crassipes*) [J]. Phy Chem Earth 2017,100:170-180.
- [36] Rezania S "Ponraj M "Md Din M F "et al. Effectiveness of Eichhornia crassipes in nutrient removal from domestic wastewater based on its optimal growth rate [J]. Desalin Water Treat 2016 57: 360-365.
- [37] 刘立岩 ,吕兴娜. 用水葫芦净化水质中氮、磷污染物的研究分析[J]. 丹东纺专学报 2005 ,12(2):40-41.
- [38] 贺丽虹,沈颂东.水葫芦对水体中氮磷的清除作用 [J].淡水渔业 2005 35(3):7-9.
- [39] 丁爱芳 唐玉娣 刘爱芳 等.2 种水生植物对富营养化水体的净化效果研究[J]. 南京晓庄学院学报 2017 6 (6):61-65.
- [40] Anandha Varun R, Kalpana S. Performance analysis of nutrient removal in pond water using water hyacinth and Azolla with papaya stem [J]. Int Res J Eng Technol 2015 (2):444-448.
- [41] 陈松. 动静模式下水葫芦净化生活污水研究 [D]. 芜湖: 安微师范大学 2018.
- [42] Wang Z Zhang Z Zhang Y ,et al. Nitrogen removal from Lake Caohai ,a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of Eichhornia crassipes [J]. Chemosphere 2013 92(2):177-183.
- [43] Ma X C Zheng H L Min A et al. Cultivation of chlorella vulgaris in wastewater with waste glycerol: strategies for improving nutrients removal and enhancing lipid production [J]. Bioresour Technol 2016 207: 252-261.

(下转第2777页)

- lution rapid prototyping system for small size objects [J]. Int J Adv Manuf Techno 2007 31:941-947.
- [9] Cohen A ,Frodis U ,Tseng F ,et al. EFAB: Low-cost automated electrochemical batch fabrication of arbitrary 3D microstructures [J]. SPIE Proc ,1999 ,10(11):12-17.
- [10] Ruz-Nuglo F D Groven L J. 3D Printing and development of fluoropolymer based reactive inks [J]. Advanced Engineering Materials 2017 20(2):1-8.
- [11] Sima R ,Tomas J ,Darius G ,et al. Nanoscale precision of 3D polymerization via polarization control [J]. Advanced Optical Materials 2016 4(8):1209-1214.
- [12] Kong Y L ,Gupta M K ,Johnson B N ,et al. 3D printed bionic nanodevices [J]. Nano Today ,2016 ,11 (3): 330-350.
- [13] Sultan S Siqueira G Zimmermann T et al. 3D printing of nano-cellulosic biomaterials for medical applications [J]. Current Opinion in Biomedical Engineering 2017(2):29–34.

- [14] Zhang F ,Wei M ,Viswanathan V V ,et al. 3D printing technologies for electrochemical energy storage [J]. Nano Energy 2017 40:418-431.
- [15] 许杜亮 莫秀梅. 3D 打印技术制备明胶纳米微球基复合凝胶支架[J]. 东华大学学报 2014 6(40):718-724.
- [16] 肖苏华 涨静娴 涨文华. 应用于 3D 打印的聚乳酸/纳 米 TiO<sub>2</sub> 复合材料制备及力学性能研究 [J]. 塑料工程 学报 2017 24(3): 219-224.
- [17] 陈宁 夏和生,张杰,等. 聚合物基微纳米功能复合材料 3D 打印加工的研究 [J]. 高分子通报,2017,10 (10):41-50.
- [18] 张恒一 冯蓓 葛阳 等. 利用静电纺纳米膜复合 3D 打 印支架构建 "C"型环状软骨的初步研究 [J]. 上海交通 大学学报 2017 37(7):896-900.
- [19] 杨接来,徐俊,谷辉杰,等. 3D 打印聚乳酸/纳米级 β-磷酸钙可吸收出山羊颈椎融合器的生物相容性及 生物力学评价[J]. 中国临床医学,2017,24(4): 525-531.

#### (上接第2767页)

- [39] 王君 . 范延辉 ,吴涛 ,等. 耐盐解烃菌的分离鉴定及其对石油污染盐碱土壤生物修复 [J]. 生态学杂志 , 2013 ,32(12): 3330-3335.
- [40] Margesin R Moertelmaier C Mair J. Low-temperature biodegradation of petroleum hydrocarbons (n-alkanes, phenol, anthracene, pyrene) by four actinobacterial strains [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013 84(Suppl 1):185-191.
- [41] 温成成. 青藏高原冻土区石油降解优势菌群的筛选及石油污染生物修复特性的研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学 2018.
- [42] 邱雪. 海洋低温石油降解菌筛选及其表面活性物质产生性能研究[D]. 大连: 大连海事大学 2018.
- [43] 王艺霖,艾雪,李师翁,等.青藏高原土壤中一株低温原油降解菌的分离鉴定及其原油降解特性[J].冰川冻土 2015 37(2):528-537.

- [44] 李兵, 张庆芳, 窦少华, 等. 低温石油降解菌 LHB16 的 筛选及降解特性研究 [J]. 生物技术, 2010, 20(5): 83-85.
- [45] 王铁媛,窦森,胡永哲,等.油水淹地石油降解菌群的筛选和鉴定及高效菌群的构建[J].吉林农业大学学报 2016 38(6):716-722.
- [46] 管亚军,梁凤来,张心平,等. 混合菌群对原油的降解作用[J]. 南开大学学报: 自然科学版,2001(4): 82-85,90.
- [47] 范瑞娟,郭书海,李凤梅,等. 石油降解菌群的构建及 其对混合烃的降解特性[J]. 农业环境科学学报, 2017,36(3):522-530.
- [48] 张文. 应用表面活性剂强化石油污染土壤及地下水的生物修复[D]. 北京: 华北电力大学 2012.
- [49] 张景来,王剑波,常冠钦,等.环境生物技术及应用[M].北京:化学工业出版社 2002.

# (上接第2772页)

- [44] Zheng H L Liu M Z Lu Q et al. Balancing carbon/nitrogen ratio to improve nutrients removal and algal biomass production in piggery and brewery wastewaters [J]. Bioresour Technol 2018 249:479-486.
- [45] Zheng Hongli ,Wu Xiaodan ,Zou Guyue ,et al. Cultivation of chlorella vulgaris in manure-free piggery wastewater with high-strength ammonium for nutrients removal and
- biomass production: Effect of ammonium concentration, carbon/nitrogen ratio and pH [J]. Bioresource Technology 2019 273: 203-211.
- [46] Park H F Jin B R Jim K Y et al. Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga Scenedesmus sp. [J]. Bioresour Technol ,2010 ,101 (22): 8649-8657.