

生物慢滤技术在水处理中的应用现状及进展

鲁金凤^{1,2,3}, 王 斌¹, 郑 亮¹, 张 上¹, 朱佳轩¹, 谢 敏¹, 杨柠羽¹

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 南开大学 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘 要: 水资源短缺及饮用水安全问题伴随着经济发展与人口增长日渐凸显, 如何解决这一问题一直备受研究者关注。生物慢滤技术是一种效率高、能耗低、操作简易的绿色水处理技术。综述了生物慢滤技术的净化原理, 全面阐述了该技术对浊度、有机污染物、细菌、金属类污染物的去除效果, 针对当前生物慢滤技术研究中存在的一些难点问题, 提出了今后研究的主要方向。

关键词: 生物慢滤技术; 雨水资源化; 水质净化

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)08-0031-05

Review on the Application of Biological Slow Filtration in the Treatment of Water Purification

LU Jin-feng^{1,2,3}, WANG Bin¹, ZHENG Liang¹, ZHANG Shang¹, ZHU Jia-xuan¹,
XIE Min¹, YANG Ning-yu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria <Ministry of Education>, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Tianjin 300071, China)

Abstract: With the development of economy and population, water shortage and drinking water safety problems are becoming increasingly prominent. How to solve those problems has attracted much attention of researchers. Biological slow filtration technology is a “green” water treatment technology with high efficiency, low energy consumption and simple operation. The purification mechanisms of the biological slow filtration are introduced, and the research progresses on the removal of turbidity, organic pollutants, bacteria, metal pollutants by this technology are summarized. Aiming at some existing difficult problems in the current research of biological slow filtration technology, the main directions of the research in the field of biological slow filtration are put forward.

Key words: biological slow filtration technology; rainwater resource; water purification

生物慢滤技术具有灵活的实现方式、高效的除污效能以及持久的运行能力, 尤其是在除菌方面具有良好表现, 是符合当前缺水地区特别是缺水村镇

大力推广应用的绿色水处理技术。在雨水净化方面, 生物慢滤罐(池)在独立运行条件下, 可高效去除雨水中的浊度及细菌、病毒, 无需其他附加处理工

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400707); 国家自然科学基金资助项目(51741807); 天津大学生创新科研资助项目(201710055333)

艺。单独的生物慢滤罐(池)即可实现雨水资源化并转化为饮用水,对解决农村缺水问题具有重要意义。在非洲地区,便携式生物慢滤净水装置作为可靠的净水设备也被国际公益组织和联合国广泛应用,该装置通过净化受污染的河水、地下水以及雨水,来满足人们正常的用水需求、保证饮水安全。当前我国对生物慢滤技术的应用相对较少,缺乏相关技术经验。

1 生物慢滤技术简介

生物慢滤是一种综合机械过滤、生物吸附降解、静电吸附、沉淀等物理化学和生物化学作用的绿色水处理技术。该技术主要依靠滤料对悬浮颗粒物的机械筛滤作用、滤料表层附着微生物层对病原体的捕食作用以及微生物层对有机污染物的吸附转化作用,来达到去除杂质、净化水体的目的。微生物层对病原体的吸附降解,既能保证层内微生物的正常生长,又能保证水体的除菌净化;微生物层在滤料表层的分布,既能增加滤料表层的致密性、增强过滤作用,又能增加与水中微生物的接触、强化吸附效能。

生物慢滤技术的关键在于滤料表层的生物膜层,滤料的成熟度(即表层形成成熟的生物膜)影响滤池内微生物的活性及水力停留时间,直接决定了该技术的处理效果。此外,温度、pH值、滤速、污染物浓度等因素皆是影响最终处理效果的关键。生物慢滤技术最大的优势在于无能耗、无污染排放,同时具有构造简单、造价低、易操作的特点,对于解决缺水国家与地区水资源短缺的问题意义重大。

2 生物慢滤技术应用效果

2.1 除浊及除污效能

浊度和有机污染物作为重要的水质指标,是饮用水处理首要解决的问题。近年来,研究人员在生物慢滤技术除浊、除污方面进行了大量的实验研究,并在某些地区进行了一定的应用研究。

Neto等^[1]使用生物慢滤技术对机场雨水进行处理,研究发现原雨水浊度为2.5 NTU,经处理后最低可降至0.6 NTU,雨水经处理后水质指标几乎都满足二次使用的标准。Baig等^[2]发现,传统生物慢滤器运行45天后接近稳定状态,浊度由6.3 NTU降至1.45 NTU左右,而在30~45天对浊度的去除效果最为明显。这是由于滤料表层在30天左右形成了成熟的生物膜,增强了滤料表层的致密性,极大地提高了反应器对浊度的去除率。Shin等^[3]发现,填

料厚为40 cm的生物慢滤池对浊度的去除率达90%,出水浊度<1 NTU;而填料厚为3 cm的生物慢滤池对浊度去除效果最差,出水浊度为2 NTU。这说明填料层的厚度对浊度的影响较大,厚度小导致滤层易堵塞,从而影响浊度的去除。此外,填料厚为3 cm的生物慢滤池与滴滤池组合的混合系统对浊度的去除率可达90%以上,出水浊度控制在0.2 NTU以下。因此,单独的生物慢滤系统在保证足够滤层厚度的前提下,能够有效去除浊度。如果滤料厚度有限,同其他系统的配合使用也能使浊度达标。Zhang等^[4]研究发现,当慢滤与粗滤联用时,在适当的条件下(温度为15~26℃,滤速为0.16 m/h)运行24天后,表层生物粘膜自然形成,出水浊度在2 NTU以下,去除率达90%。而单独的粗滤系统在稳定运行状态下对浊度的去除率为85%左右,出水浊度较高。微生物的吸附沉降作用对浊度的去除极其重要,仅仅依靠滤料的机械过滤很难使浊度达标。然而,Ahammed等^[5]使用涂铁砂粒与未涂铁砂粒的滤料进行了对比研究,发现两者在去除浊度效能方面差别不大,两者进水浊度均为14.7 NTU,经处理后出水分别为1.2、1.0 NTU,去除率分别达到92%和93%。上述结果说明,改进滤料类型对浊度去除率的影响十分有限。这可能是因为生物慢滤技术本身对浊度具有高效的去除效果,单纯改进滤料不能增加水力停留时间或微生物的吸附效果,对滤料的微生物层结构影响较小,故处理效果变化不明显。

Shin等^[3]发现,在生物慢滤反应器开始运行阶段,对TOC的去除效果较差,仅为63.4%。运行至第六个阶段(31~33天),TOC可由18.8 mg/L降低至2.52 mg/L,去除率达86.6%。Matteo等^[6]选用咖啡因、卡巴咪嗪、雌素酮、二甲苯氧庚酸等6种化合物检验生物慢滤技术对活性化合物的去除效果。研究发现,生物慢滤反应器对二甲苯氧庚酸的去除率十分有限(去除率<10%),对咖啡因的去除率约100%,对雌素酮的去除率为92%,但 β -雌二醇含量却出现了增加。此外,生物慢滤技术对卡巴咪嗪与安替比林基本无去除效果,其含量变化不大。以上结果说明,生物慢滤技术对活性化合物的去除具有选择性,化合物种类不同,降解所需环境和微生物也不同。同时化合物会在微生物作用下发生转化,生物慢滤技术对活性化合物的处理效果存在不稳定性。Maeng等^[7]进行了混合系统除污实验,通过对

比,滴滤+生物慢滤+膜的组合工艺对有机物的去除效果最为显著,COD从51 mg/L降至1.53 mg/L,去除率达97%;TOC的去除率同样达91%。而膜+生物慢滤组合系统与单独膜系统相比,去除效能更加显著,前者对COD的去除率达69.2%,后者仅为24.6%。以上实验结果表明,生物慢滤技术对污染物的去除效果明显,微生物黏膜的吸附降解作用使得污染物得到有效去除。

综合各实验结果发现,生物慢滤技术在除浊方面的效果较显著,出水浊度均能满足饮用水卫生标准要求,且随着滤料的成熟,除污效率会进一步提升。相比之下,生物慢滤在除污方面的效果不够稳定,单独运行时对TOC的去除有效,对活性化合物的去除波动较大。为提高污染物去除率,研究人员将生物慢滤技术与其他技术联用,有机污染物在生物吸附降解、生物氧化、物理氧化等多种作用下得到了充分的去除,效果十分显著。

2.2 除菌能力

生物慢滤技术的另一大优势就是除菌效果好,出水可不进行化学消毒,就能保证出水的卫生学安全性。研究人员发现若将生物慢滤器的运行参数调整至最优状态,细菌、病毒几乎可以达到完全去除。

Schijven等^[8]分别使用噬菌体MS2和大肠杆菌WR1作为病毒和细菌的代表来测试生物慢滤技术的除菌效能。生物膜经过137天的培养,生物慢滤器对MS2和WR1的累积去除率分别达到3.1lg和4.5lg,去除效率在较高温度下会进一步提高。细砂滤料($d=0.29\text{ mm}$)较粗砂滤料($d=0.55\text{ mm}$)而言,对MS2和WR1具有更高的去除率。Wang等^[9]在多种条件控制下,验证了生物砂滤器对噬菌体MS2和轮状病毒的去除效果。对轮状病毒而言,运行1~31天,停留10 min后的累积去除率为3.54lg,而停留24 h后达4.92lg。对MS2而言,运行650~684天,停留10 min的累积去除率为0.52lg,停留24 h后累积去除率达5.36lg,全过程平均去除率达到5.6lg,高于美国环保署病毒去除率为4lg的标准。上述实验结果表明,MS2主要依靠滤料生物吸附去除,长时间运行使滤料成熟,处理效率大幅提高;而轮状病毒受滤料成熟度影响较小,主要依靠物理去除,停留时间增加,病毒与滤料接触充分,去除效率更加明显。此外,Wang等^[10]使用含1.5 mmol/L的 Ca^{2+} 和1.0 mmol/L的 Mg^{2+} 的地下水进行实验,发

现二价离子能够使生物砂颗粒对MS2的吸附效率显著提高,且去除过程主要发生在上层微生物层内。Elliott等^[11]将滤料的孔体积控制为18.3 L,分别进行了日处理量为20 L和40 L的实验,结果表明,前者对大肠杆菌的处理效率为90%~98%,而后者去除率仅为75%,该结果差异性可解释为两者的水力停留时间(HRT)不同所致。在反应器间歇期,前者几乎所有体积原水在滤料孔隙中保持停留并在滤床充分处理,而后者仅有一半原水保持停留,处理效率受限。Baig等^[2]尝试在滤料层中添加5 cm厚的松树皮生物炭填料(CPBB),研究发现改进后的生物慢滤器运行30天后对大肠杆菌的去除率达100%,运行30~60天后去除率为96%,而相同运行条件下传统生物慢滤器的去除率为90%。运行时间超过75天后慢滤器对大肠杆菌的去除效果开始下降,传统滤器去除率降至60%,而改进型滤器依然保持在90%左右。由此可见,改进的生物慢滤技术对大肠杆菌可长时间保持高效的去除,这是因为CPBB具有强吸附能力,且延长了HRT。Kennedy等^[12]也验证了HRT对除菌效果的影响。他们通过改变生物慢滤反应器的出水孔径(0.25、0.37、0.5英寸),来验证HRT对除菌效果的影响。实验结果表明,HRT越长,生物慢滤器的去除效率越好。三种反应器在充分运行后,对细菌的去除率均大于99%。

总体而言,多数菌类微生物依靠生物慢滤技术的生物作用而被去除,可通过控制HRT与运行时间来获得最佳去除效果,少数细菌则依靠滤料的物理吸附作用而被去除。此外,反应器材质对除菌效果产生影响的原因文献中未提及,目前尚不明确,还需做进一步的研究。

2.3 其他

重金属类污染物具有含量小、毒性大、去除难等问题,去除水中的重金属类污染物一直是近年来饮用水安全方面的难点问题。以砷类金属为代表物质,重点分析生物慢滤技术在金属类污染物去除方面的原理和效能。

Nitzsche等^[13]在越南进行了家用式生物砂滤器的水处理实验,结果显示,进水总砷(96%以亚砷酸盐的形态存在)、总铁含量分别为115 $\mu\text{g/L}$ 和16.3 $\mu\text{g/L}$,经处理后出水总砷降至5.3 $\mu\text{g/L}$ (其中亚砷酸盐含量低于检出限),总铁含量低于检出限,两者的去除率分别为95.4%和100%。Snyder等^[14]进

行了醋酸改性厌氧生物滤池除砷的实验研究,发现醋酸作为厌氧微生物的电子供体,能促进微生物快速生长,而基于醋酸盐的新陈代谢过程能产生明显的砷去除以及抑制固定化的砷释放。此外,水中的硫酸盐、铁离子均会对砷的去除产生影响,在添加22 mg/L 硫酸盐前提下,砷酸盐的浓度可由200 $\mu\text{g/L}$ 降至88 $\mu\text{g/L}$;而在添加50 mg/L 硫酸盐和4 mg/L 铁的条件下,砷酸盐的浓度由200 $\mu\text{g/L}$ 降至133 $\mu\text{g/L}$ 。出现上述情况,主要是因为硫酸盐和含铁化合物过量,导致沉淀的砷化合物解吸附,重新进入水中。Berg 等^[15]的生物砂滤除砷实验数据显示,砷在生物砂的氧化作用以及与铁的共沉淀作用下能得到有效去除,前者去除率可达88%,后者为70%。溶解态的铁是影响砷去除的关键因素,在进水铁/砷比为50~250时,出水砷浓度可控制在50 $\mu\text{g/L}$ 以下,且当铁/砷比>250时,出水砷含量可满足世卫组织要求的10 $\mu\text{g/L}$ 以下。磷酸盐能够对砷去除产生阻碍作用,当磷酸盐浓度>2.5 mg/L时,最高能降低35%的砷去除率。出现以上情况,主要是由于铁能与砷发生共沉淀作用来提高砷的去除,磷酸盐则会与氧化砷竞争吸附点位,抑制其有效去除。Maeng 等^[7]证明了生物慢滤同滴滤、膜的混合系统对砷的去除极为有效。使用零价铁作为吸附剂的前提下,对砷的去除率达97%,而滴滤+膜系统对砷的去除率仅为16%,出现该结果的原因是前者的水力停留时间更长(24 h),对砷的氧化作用及微生物的吸附作用更加充分,特别是滤料层微生物群对砷的去除产生重要作用;后者缺乏生物作用的有力吸附,并且在短时间内通过系统,达不到有效的去除效果。

许多研究证明,砷在共沉淀与生物吸附作用下能得到去除,但目前生物慢滤技术在除砷方面缺乏稳定性和高效性,单独生物慢滤技术的去除效能有限,同时,去除效果受水中铁、硫酸盐等因素的影响较大,出水水质常常不能达到世卫组织的标准。研究人员发现^[16,17],微生物慢滤与零价铁联用或在厌氧条件下,除砷效率得到了明显提高,这也将是生物慢滤技术今后重要的研究方向之一。

3 生物慢滤技术应用的难点问题

许多研究证明,生物慢滤技术在实验阶段表现出良好的处理效果,但在实际应用时会面临一系列难点问题。

① 目前生物慢滤技术的研究多处于实验阶

段,实验条件可以按照要求进行控制,如果应用在实际中会面临条件不可控的问题,因此会对生物慢滤的处理效率产生影响。

② 生物慢滤技术对重金属类污染物的去除不够稳定,以砷为例,出水常常不能满足世界卫生组织要求(砷浓度<10 $\mu\text{g/L}$)。

③ 目前生物慢滤技术的实验研究多为连续性实验,在实际应用中会面临较长间歇期,再次启动时难以保证反应器具备最佳运行状态。

④ 长时间运行后要对滤料层进行清污,但清污难以保证对滤料表层微生物的扰动最小。

⑤ 在实际应用中,原水中的纳米微粒在生物慢滤系统中具有较强的迁移能力,以及受水体其他物质的影响,导致其处理效果不理想。

4 结语

生物慢滤技术作为一项零耗能、零污染、低造价的绿色水处理技术,在去除水中的污染物、浊度、细菌病毒、重金属类污染物等方面非常有效,该技术已经在世界各地进行了一定规模的应用,运行效果与预期比较符合。近年来,研究者尝试对生物慢滤技术进行改进,包括改性滤料表面结构、调整滤层结构等,或与滴滤技术、膜技术、粗滤技术等其他技术联用,处理效果在原技术基础上进一步提升,特别是在重金属去除、污染物去除方面效果强化明显。

针对生物慢滤技术存在的问题,今后的研究主要集中在以下几方面:

① 研究生物慢滤在重金属类污染物去除方面的前沿技术,重点开发新型生物慢滤同步除砷、除氟技术,确保出水重金属类含量稳定保持在世界卫生组织要求的限值以下;

② 进行新型病毒生物慢滤系统的去除效能及病毒对生物慢滤系统内微生物的影响研究;

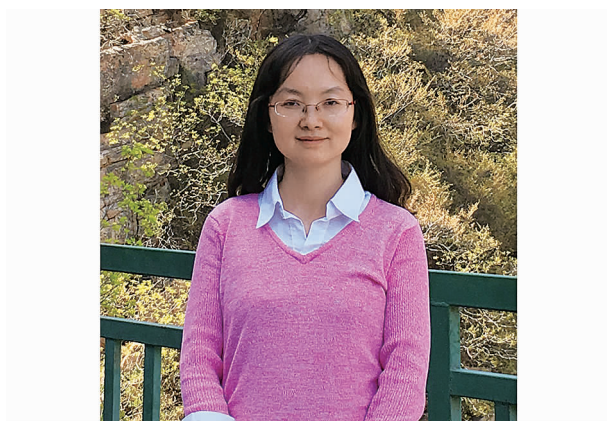
③ 解决反应器运行间歇期结束后,短时间快速启动的问题。例如,保持何种环境可避免微生物死亡、添加何种营养物质使微生物恢复活性;

④ 家庭式生物慢滤罐雨水处理一体化装置的开发与集中式大型生物慢滤雨水/饮用水处理系统的开发;

⑤ 结合生物慢滤技术自身的优势,开发改进型技术或与其他工艺的联用技术,进一步提高生物慢滤技术对雨水及饮用水的处理效能,保障饮用水的安全。

参考文献:

- [1] Neto R F M, Calijuri M L, Carvalho I D C, *et al.* Rain-water treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs[J]. *Resour, Conserv Recycl*, 2012, 65(4): 124 – 129.
- [2] Baig S A, Mahmood Q, Nawab B, *et al.* Improvement of drinking water quality by using plant biomass through household biosand filter—A decentralized approach[J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(11): 1842 – 1848.
- [3] Shin G A, Kim T Y, Kim H S, *et al.* Membrane hybrid system combined with a trickling filter and a thin layer of biosand to reduce high levels of organic matter in drinking water in developing countries[J]. *Process Saf Environ Prot*, 2016, 104: 541 – 548.
- [4] Zhang G, Song W, Wu F, *et al.* Study on rough filtration plus slow sand filtration techniques for cellar water of villages and towns in Northwest China[A]. *International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management*[C]. USA: IEEE, 2012.
- [5] Ahammed M M, Davra K. Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water[J]. *Desalination*, 2011, 276(1/3): 287 – 293.
- [6] D'Alessio M, Yoneyama B, Kirs M, *et al.* Pharmaceutically active compounds: Their removal during slow sand filtration and their impact on slow sand filtration bacterial removal[J]. *Sci Total Environ*, 2015, 524/525: 124 – 135.
- [7] Maeng M, Choi E, Dockko S. Reduction of organic matter in drinking water using a hybrid system combined with a rock biofilter and membrane in developing countries[J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2015, 102: 223 – 230.
- [8] Schijven J F, Berg H H J L van den, Colin M, *et al.* A mathematical model for removal of human pathogenic viruses and bacteria by slow sand filtration under variable operational conditions[J]. *Water Res*, 2013, 47(7): 2592 – 2602.
- [9] Wang H, Li M, Brockman K, *et al.* Reduction of MS2 bacteriophage and rotavirus in biosand filters[J]. *Environ Sci: Water Res Technol*, 2016, 2(3): 483 – 491.
- [10] Wang H, Narihiro T, Straub A P, *et al.* MS2 bacteriophage reduction and microbial communities in biosand filters[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(12): 6702 – 6709.
- [11] Elliott M A, Stauber C E, Koksai F, *et al.* Reductions of *E. coli*, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter[J]. *Water Res*, 2008, 42(10/11): 2662 – 2670.
- [12] Kennedy T J, Hernandez E A, Morse A N, *et al.* Hydraulic loading rate effect on removal rates in a biosand filter: A pilot study of three conditions[J]. *Water, Air, Soil Pollut*, 2012, 223(7): 4527 – 4537.
- [13] Nitzsche K S, Lan V M, Trang P T K, *et al.* Arsenic removal from drinking water by a household sand filter in Vietnam—Effect of filter usage practices on arsenic removal efficiency and microbiological water quality[J]. *Sci Total Environ*, 2015, 502: 526 – 536.
- [14] Snyder K V, Webster T M, Upadhyaya G, *et al.* Vinegar-amended anaerobic biosand filter for the removal of arsenic and nitrate from groundwater[J]. *J Environ Manage*, 2016, 171: 21 – 28.
- [15] Berg M, Luzzi S, Trang P T, *et al.* Arsenic removal from groundwater by household sand filters: Comparative field study, model calculations, and health benefits[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5567 – 5573.
- [16] Neumann A, Kaegi R, Voegelin A, *et al.* Arsenic removal with composite iron matrix filters in Bangladesh: A field and laboratory study[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(9): 4544 – 4554.
- [17] Burton E D, Johnston S G, Bush R T. Microbial sulfidogenesis in ferrihydrite-rich environments: Effects on iron mineralogy and arsenic mobility[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75(11): 3072 – 3087.



作者简介:鲁金凤(1980 –), 女, 山西朔州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水的深度处理技术。

E – mail: lujinfeng625@126. com

收稿日期: 2017 – 09 – 21