

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.002

# 介质生物膜技术的历史、现状与未来

郝晓地, 闫颖颖, 吴道琦, 吴远远

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理  
技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 在污水处理厂提标改造的驱动下,亟需开发因用地受限的原位改造技术。在此方面,颗粒生物膜(好氧颗粒污泥)突显优势。然而,颗粒生物膜技术工艺条件较为严格,颗粒形成不易、颗粒保持更难。另一种形式的生物膜——介质生物膜则因工艺条件简单、生物膜易形成且不易脱落或破碎而受到关注。纵观介质生物膜工艺的发展历程,这种最古老的污水处理形式如果能与时俱进则可能重现新的生命力,其作用与颗粒污泥相当。介质生物膜载体应继续向微细化方向发展,但应选择或合成密度略高于水的有机耐降解材料。介质微细化可使生物膜量大幅增加,无需絮状污泥再行参与,完全可借助沉淀而淘汰絮状污泥,形成以生物膜为核心的单污泥工艺。介质微细化后,介质生物膜易动态悬浮或循环,可形成间歇式或连续式同步脱氮除磷工艺。在此方面,介质生物膜的效果与颗粒污泥相同,且更容易形成生物膜并维持其稳定。

**关键词:** 介质生物膜; 介质微细化; 介质密度; 介质材料; 单污泥系统; 颗粒污泥

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0009-06

## History, Status and Future of Carrier Biofilm Technologies

HAO Xiao-di, YAN Ying-ying, WU Dao-qi, WU Yuan-yuan

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of  
Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of  
Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Driven by upgrading of wastewater treatment plants (WWTPs), the onsite upgrading technologies are very necessary because of limited spaces. Therefore, granular biofilm (aerobic granular sludge, AGS) have been developed with advantages. However, granular biofilm technologies have strict requirements on process design, and it is difficult to form particles and maintain them. Conversely, another form of biofilm, the carrier biofilm, seems to be simple in process design, easy to form membrane, and it is stable in biofilm fragmentation/detachment. Throughout the whole development process of carrier biofilm, if the oldest form of wastewater treatment would keep pace with the times and play the role of AGS, it will have new vitality. Carrier biofilm should be developed in the direction of micronization. But it is necessary to select and/or synthesize bio-stable materials with a densities slightly higher than that of water. Carrier micronization could help the growth of biofilm, and flocculent sludge can be eliminated by precipitation without further participation, forming a single sludge process with biofilm. It is easy for the biofilm to be suspended or circulated dynamically after the medium is micronized, which can form batch

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170018)

(SBR) or continuous simultaneous nitrogen and phosphorus removal process. In this way, carrier biofilm is actually equivalent to granular sludge, and it is even more convenient for the treatment than granular sludge in terms of biofilm formation and maintenance.

**Key words:** carrier biofilm; carrier micronization; carrier density; carrier material; single sludge systems; granular sludge

出水排放标准的不断提升导致污水处理升级、扩容不断,扩容升级因用地和资金限制往往难以实现。因此,在既有曝气池通过原位提高生物量的做法已成为目前主要的技术选项。其中,向曝气池投加挂膜介质的方法较为常见,大到厘米级的塑料载体(如MBBR工艺)、小到毫米级的无机载体[如美国的轻质合成介质(MOB)工艺<sup>[1]</sup>和中国的粉末介质(HPB)工艺<sup>[2-3]</sup>]均已开始应用。

事实上,介质生长生物膜法基于土壤自然净化过程原理,相对于基于水体自净原理的活性污泥法具有更加紧密和多样化的微生物结构,容易聚集较高浓度的生物量,可有效减少处理工艺占地或增加处理负荷。介质生物膜的基本特性(如粗糙度、表面物理/化学性质、孔隙结构、比表面积等)很大程度上会影响生物膜的形成效果,其悬浮时的密度又会影响工艺能耗。

目前,颗粒生物膜(好氧颗粒污泥)技术已逐渐应用于实践,但与介质生物膜技术相比,颗粒生物膜的形成与保持需要严格的工艺筛选与控制条件,且易受进水负荷与基质变化的影响。在这一敏感问题上,介质生物膜则显示出生物膜易形成性及其附着稳定性。因此,有必要在横向对比颗粒生物膜内、外在特点的基础上重新审视介质生物膜技术的未来,以期获得与颗粒污泥相同生物量效果和运行效果,并充分利用其运行与控制方面的易操作性特点。

梳理了介质生物膜技术的发展历程,简述了介质生物膜技术的基本原理与特点,描述了其研发与应用历程,继而提出介质生物膜技术的未来发展方向。

## 1 介质生物膜的发展历程

### 1.1 生物滤池

介质生物膜形式随着介质材料的升级与生物膜法工艺的迭代不断发展,早在1893年,英国人科贝特(Corbett)通过模仿土壤自净过程创造了最早形

式的生物膜法——滴滤池,这一技术通过将污水喷洒至固定粗质滤料表面,在利用滤料拦截颗粒污染物的同时,借助滤料表面微生物定殖形成的生物膜转化流经污水中的有机物及氮、磷等营养物质,以此达到净化污水的目的。以介质生物膜为核心的生物膜法从此拉开了污水处理的序幕,并与活性污泥法一同用于污水处理。

早期的生物滤池通常采用卵石、碎石、炉渣等低比表面积天然无机材料作为介质,这类介质虽然净化效果较好,但生物附着量有限,处理负荷较低,导致工艺占地面积大、处理效率低。由于固定床反应器存在易堵塞问题,需定期反冲洗,因此其应用受到一定限制。为此,研究人员采取处理水回流措施,在稀释进水负荷的同时减轻堵塞并不断更新生物膜,从而逐步发展出高负荷生物滤池等改良滤池工艺。然而,受限于介质材料的发展水平,生物膜法难以在性能上进一步突破。因此,从20世纪40—50年代起,生物膜法大有被活性污泥法取代的趋势。直至20世纪60年代,质轻、高强、耐蚀的有机合成介质大量生产并广泛使用,使得介质生物膜法重获新机,并逐步衍生出生物转盘、生物接触氧化、移动床生物膜反应器等新工艺。

### 1.2 生物转盘

生物转盘起源于20世纪60年代原联邦德国,当时,斯图加特工业大学的Popel和Hartman教授对其实用化进行了大量试验研究和理论探讨,并在1964年发表了《生物转盘设计、计算与性能》一文,就此奠定了该技术的发展基础。实际上,生物转盘技术是一种通过不断旋转半浸没于污水中的盘片,使其交替与污水和空气接触,并借助其表面附着的生物膜净化污水的生物膜法工艺。其中,作为生物膜介质的盘片通常采用聚氯乙烯平板盘面、聚酯玻璃钢波纹板等形式,直径一般为1~4 m<sup>[4-5]</sup>。相较于传统生物滤池与活性污泥法,生物转盘加强了生物膜、污水与空气间的传质,并省去了曝气及污泥回

流能耗,因此可聚集较多生物量并提升处理负荷及处理效果。生物转盘技术于20世纪70年代被引入我国,现已广泛应用于生活污水、工业废水处理领域。然而,大尺寸盘面及其运行模式意味着生物转盘存在比表面积及空间效率均较低的技术缺陷,使得该技术需依靠多组盘片与更大的设备占地来实现高生物量与良好的处理效果。

### 1.3 生物接触氧化法

生物接触氧化法由生物滤池和活性污泥曝气结合演变而来。实际上,早在20世纪30年代的美国便已出现以砂石、竹木、金属制品等材料为填料的生型装置,但介质性能局限带来的有限工艺效果使其在当时难以有效拓宽市场。直至20世纪70年代,大孔径、高比表面积蜂窝直管填料与立体波纹塑料填料的出现,才使其得到更大范围的应用。该技术实质上是利用为污水曝气充氧以搅拌混合体系中各相的同时,增强生物膜氧传质及污染物去除效果。在污水处理过程中,作为生物膜介质的填料完全浸没于流动的充氧污水中,逐步富集生长生物膜并净化污水。换言之,生物接触氧化法相当于在传统活性污泥曝气池中填充固定介质以供微生物栖息及作用,属于双污泥(生物膜+活性污泥)范畴。由于反应体系中缺乏适宜的剪切作用,介质生物膜难以自行脱落并及时更新老化生物膜,导致生物接触氧化法存在易堵塞而需要定期清洗介质的问题。

### 1.4 生物流化床

20世纪70年代初,为进一步提高处理设备单位容积生物量和强化传质作用,应用于化工领域的流化床被引入污水生物处理领域,以填充介质充当生物膜载体而开展研究与应用。其工艺原理在于利用气流或液流等动力使流化床内的介质呈流化状态,附着并包裹介质的生物膜能够与污水充分接触而降解其中的污染物,从而达到良好的污水净化效果。为此,生物流化床的稳定运行在很大程度上依靠良好的流态予以实现,而合适的布水或布气方式是技术关键之一。其中,生物流化床多以小粒径(一般为0.25~1.2 mm)、大比表面积重质材料作为生物膜介质,如石英砂、生物陶粒、沸石等。因此,生物流化床相间传质及微生物量相较于其他生物膜法均有极大程度的提升,而且悬浮介质之间相互碰撞与剪切能够保证生物膜不断更新并维持适宜

厚度以维持较高的生物膜活性。

### 1.5 移动床生物膜反应器

移动床生物膜反应器(MBBR)诞生于20世纪80年代中期,旨在解决固定床反应器需定期反冲洗、流化床需使介质流化、生物接触氧化法堵塞需清洗滤料和更换曝气器等复杂操作问题。该技术实质在于构建双污泥处理体系,即,向反应池中投加可自由移动的悬浮介质,在富集生长生物膜的同时也可保留体系内悬浮生长的活性污泥絮体,不仅增加了生物量亦同时发挥各自优势。这一工艺原理与当前我国城镇污水处理厂的提标或扩容改造需求类似,故应用广泛。MBBR填充介质以聚乙烯、聚丙烯等轻质有机合成材料为主体,密度略小于水,尺寸一般为5~25 mm。因介质材料成型的易塑性,MBBR介质比表面积通常能达到200~400 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,可为生物膜附着提供足量位点。需要意识到的问题是,这种双污泥系统因介质间的相对运动会使活性污泥絮状体不断受到剪切作用,导致污泥细化而难以在沉淀池沉淀<sup>[6]</sup>。此外,悬浮、流化的塑料介质一般只停留在反应池内,不能随絮状污泥一道循环。因此,介质生物膜所增加的生物量对生物除磷几乎没有作用,这是因为磷细菌(PAOs)为动态细菌,需要在循环的厌氧→好氧/缺氧环境下才能增长。

### 1.6 新兴介质工艺

近年来,聚焦于生物膜法,向曝气池中添加类似流化床微细介质的新工艺开始出现,如美国MOB工艺<sup>[1]</sup>与中国的HPB工艺<sup>[2-3]</sup>。其中,美国的MOB介质尺寸<1 mm、密度略大于水,而中国的HPB介质以硅藻土负载硫铁矿为载体,平均粒径为28 μm,密度(≥2.0 g/cm<sup>3</sup>)则大大超过水的密度。从运行模式上看,这两种工艺与MBBR工艺原理一样,只不过介质颗粒微细化使其比表面积更大、可聚集生物膜更多,但构建的仍然是双污泥系统。与MBBR不同的是,这种工艺需要载体与活性污泥絮体一同循环、回流。因此,需在二沉池回流线路上设置载体与生物膜分离装置,如HPB工艺借助旋流分离器实现介质与生物膜的分离并回收。

## 2 介质生物膜的结构与工艺特点

### 2.1 生物膜结构

虽然介质生物膜技术的发展历程漫长,但各类技术的作用原理基本一致,都是利用介质作为支撑

载体来生长生物膜。介质生物膜厚度随着微生物增殖而不断增加,从外向里因氧传质受限而出现如图1所示的分层结构,最外层为好氧层,中间为缺氧层,最里层甚至因 $O_2$ 和 $NO_3^-$ 无法扩散到达而可能出现厌氧层。生物膜本身是亲水的,因此在其好氧层外还会存在浮动(附着)水层,作为流动污水与生物膜之间的传质中介(见图1)。污染物通过附着水层进入生物膜后,有机物降解及硝化作用主要发生在外部好氧层,反硝化则发生在中部缺氧层(无 $O_2$ 但 $NO_3^-$ 进入)。在间歇式(SBR)或微细载体连续循环流工艺条件下,载体生物膜因时间或空间上的顺序可实现厌氧→好氧/缺氧交替动态循环,并富集聚磷菌(PAOs/DPB),从而实现载体生物膜的同步脱氮除磷<sup>[7]</sup>。

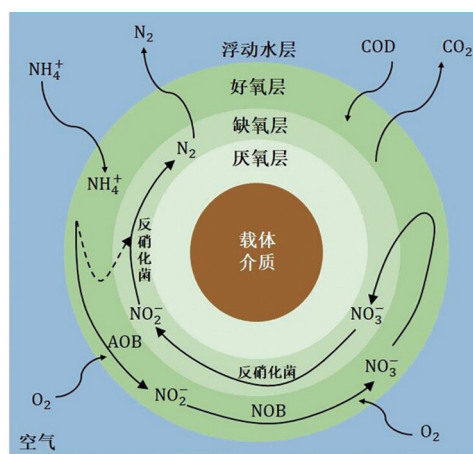


图1 普通介质生物膜平面结构与物质转移

Fig.1 Plane structure of ordinary carrier biofilm and mass transfer

介质生物膜工艺的正常运行取决于生物膜的稳定附着。当生物膜形成量远大于脱落量时,便可形成稳定的生物膜;而当生物膜中微生物的生态系统对污染物降解达到动态平衡与稳定状态时,则生物膜趋于成熟。在这一过程中,借助与水层之间的多种传质作用,生物膜中微生物可吸收营养物质并排除代谢产物,以维持生物膜系统的稳定。当氧与营养物传质限值达到阈值时,内层微生物进入厌氧状态与老化衰亡期,直接导致胞外聚合物(EPS)黏附力减弱,并在外部剪切或内部产生的气体冲击作用下脱落。与老化生物膜分离后的介质又逐渐被新一轮微生物附着,以此往复。

## 2.2 工艺特点

介质生物膜中微生物密度高、菌种丰富、泥龄

较长,与活性污泥法相比,具有更好的沉降性能与处理效能。

### 2.2.1 污泥产量低

因介质生物膜为微生物提供了天然的庇护条件,且其中含有不同的含氧微环境,这就比活性污泥具有更丰富的菌种以及较长的食物链。进言之,固着于介质上的生物膜可较长时间停留于载体上,与絮状污泥停留时间(SRT)无关,这使得世代时间较长、比增殖速度较低的细菌能够生长其中,如硝化细菌等。这样的工艺条件亦可使以细菌等为食的高层次营养水平生物如原生动物、后生动物乃至昆虫存在,使得食物链变长,最终产生的生物量比活性污泥处理系统更少(约1/4)<sup>[8]</sup>,也即,剩余污泥产量较低。

### 2.2.2 污染物同步去除

介质生物膜中存在不同的含氧微环境,故具有同时去除多种污染物的潜力。当其处于适当含氧环境时,介质生物膜系统能够发生除碳、同步硝化反硝化,甚至同步脱氮除磷过程。

### 2.2.3 系统稳定性高

与絮状活性污泥相比,介质生物膜具有更长且多样的食物链,在面临水质或水量冲击负荷时具有较高的缓冲能力与系统韧性。同时,具有特殊构造的介质能够为微生物的生长繁殖提供庇护,使其免受曝气、水流或介质之间的剪切与摩擦作用,促进生物膜的形成,进一步提高其本身与系统的稳定性和抗冲击能力。

### 2.2.4 泥水分离效果良好

介质生物膜具有致密的结构和较大的密度,因此具有良好的沉降性能与泥水分离效果。即使是老化剥落的生物膜碎片,其沉降性能依旧能达到普通活性污泥的1~3倍<sup>[8]</sup>。此外,对于以重质材料为介质的动态生物膜而言,介质重力压载作用能够进一步提高生物膜的沉降性能,在较短时间内通过重力分离手段便能快速实现良好的泥水分离效果。

### 2.2.5 无污泥膨胀问题

与絮状活性污泥不同,介质生物膜即使因环境条件滋生丝状细菌也不会导致污泥膨胀,这是因为丝状细菌会被严实地包裹在生物膜中,难以使密实的生物膜结构变为蓬松状态。

## 3 介质生物膜技术的未来

纵观介质生物膜技术的发展历程(见图2),介

质生物膜工艺主要依托于介质材料及其形式革新而迭代,应用工艺表现为介质细化、浮动至动态循环,但目前污泥组成还是以介质生物膜辅助絮状活性污泥的双污泥系统为主。

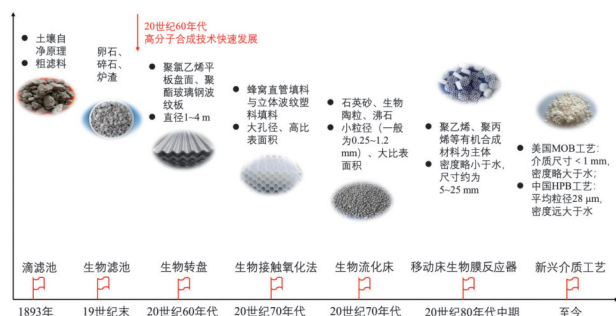


图2 介质生物膜技术的发展历程

Fig.2 Progress of carrier biofilm technologies

介质生物膜技术的未来仍然应该朝着微细化(<1 mm)的载体方向发展,介质密度是关键之一。此外,双污泥系统则应向以介质生物膜为核心的单污泥系统转变,因为微细介质的生物量富集程度能够满足生物处理的需要,不再需要絮状污泥有限而又可能被剪切细化的生物量,不仅能达到与颗粒污泥相同的运行效果,还能避免颗粒污泥形成的苛刻布水与曝气工艺条件以及遇到不利环境条件易解体的弊端。

从介质材料本身讲,高密度材料不应作为首选对象,特别是无机材料。这是因为介质密度大对所需的曝气量过大,导致能耗过高。另一方面,一旦无机载体进入剩余污泥将导致污泥有机成分降低,后续污泥处理无论是传统厌氧消化还是未来污泥焚烧都会受限。因此,介质填料应向密度略比水大的有机、耐降解材料方向发展,即使进入剩余污泥也可通过干化焚烧解决<sup>[9]</sup>。

在早期固定介质单污泥生物膜(如生物滤)工艺中,生物膜无法移动或动态循环,因此,生物膜的生化作用仅限有机物(COD)去除以及硝化和有限的反硝化与生物除磷(合成之需)。好氧颗粒污泥作为一种新的生物膜形式之所以获得同步脱氮除磷的效果是因为在运行时间上可以依次实现厌氧→好氧/缺氧动态循环。所以,微细化介质单污泥生物膜工艺完全可以藉颗粒污泥一样的运行方式实现同步脱氮除磷。当然,介质生物膜也可实现连续流运行,通过缩短二沉池沉淀时间冲刷掉絮状污泥,并使载体污泥(部分需脱膜处理)回流,则可实现同

步脱氮除磷。

事实上,介质生物膜确实与颗粒生物膜具有异曲同工之处,其立体结构与分层生化作用如图3所示。两者不同之处在于一个有“核”(介质生物膜)而另一个无核(颗粒生物膜)。介质生物膜可利用自身结构特性促使细菌分泌更多的EPS,从而改变生物膜的疏水性,增大细胞间凝聚力,促使污泥聚集形成生物膜<sup>[10-11]</sup>,这会使得依附于介质的生物膜比颗粒生物膜易形成且更加稳定。

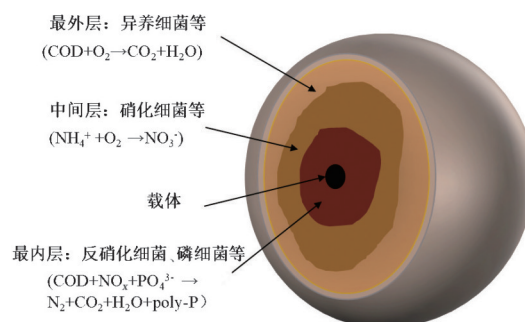


图3 介质生物膜立体结构与分层生化作用

Fig.3 Three-dimensional structure and layered biochemistry of medium biofilms

#### 4 结语

通过总结介质生物膜技术的发展历程,结合介质生物膜工艺的原理与特点,从而对未来介质生物膜技术发展做出预见性判断。

① 介质生物膜技术正在向微细化介质方向演变,但目前仍以生物膜辅助絮状污泥的双污泥工艺为主。

② 介质生物膜技术作为最古老的污水处理工艺今后仍具可持续生命力,但需要与时俱进。

③ 未来介质生物膜技术向微细化介质方向发展无误,但介质材料应避免大密度的无机材料,应选择密度比水略大的有机、耐降解材料。

④ 介质微细化可大大增加载体的比表面积,增大生物膜量,因此无需再作为絮状污泥的辅助措施,完全可以实现以生物膜为核心的单污泥系统,以避免絮状污泥因介质运行剪切细化而出现难以沉淀问题。

⑤ 介质生物膜与颗粒生物膜(好氧颗粒污泥)结构与净化作用具有异曲同工之妙,但比颗粒生物膜更易形成结构稳定、不易解体或脱落的生物膜。

## 参考文献:

- [1] NUVODA. Mobile organic biofilm (MOB) [EB/OL]. [2024-01-13]. <https://www.nuvodaus.com/mob/>.
- [2] 颜加兴, 顾群, 邓宇, 等. 硅藻土基复合粉末载体在城镇污水处理中的应用 [J]. 净水技术, 2023, 42(3): 106-112.  
YAN Jiaying, GU Qun, DENG Yu, *et al.* Application of diatomite-based composite powder carrier in municipal wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 106-112(in Chinese).
- [3] WANG C X, CHAI X L, LU B, *et al.* Integrated control strategy for dual sludge ages in the high-concentration powder carrier bio-fluidized bed (HPB) technology: enhancing municipal wastewater treatment efficiency [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119890.
- [4] HASSARD F, BIDDLE J, CARTMELL E, *et al.* Rotating biological contactors for wastewater treatment—a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 94: 285-306.
- [5] FREEMAN D, FERNANDEZ Y B, WILSON A, *et al.* Nitrogen oxidation consortia dynamics influence the performance of full-scale rotating biological contactors [J]. Environment International, 2020, 135: 105354.
- [6] 郝晓地, 安兆伟, 孙晓明, 等. 悬浮填料强化污水生物处理的实际作用揭示 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 5-9.  
HAO Xiaodi, AN Zhaowei, SUN Xiaoming, *et al.* Effect of suspended carriers on enhancing biological wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8): 5-9 (in Chinese).
- [7] MORELLO R, DI CAPU F, ESPOSITO G, *et al.* Sludge minimization in mainstream wastewater treatment: mechanisms, strategies, technologies, and current development [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115756.
- [8] 郝晓地. 可持续污水-废水处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
HAO Xiaodi. Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006 (in Chinese).
- [9] LI J, HAO X D, SHEN Z, *et al.* Low-temperature drying of waste activated sludge enhanced by agricultural biomass towards self-supporting incineration [J]. Science of the Total Environment, 2023, 888: 164200.
- [10] CHEN Y P, ZHANG P, GUO J S, *et al.* Functional groups characteristics of EPS in biofilm growing on different carriers [J]. Chemosphere, 2013, 92(6): 633-638.
- [11] ZHANG P, FANG F, CHEN Y P, *et al.* Composition of EPS fractions from suspended sludge and biofilm and their roles in microbial cell aggregation[J]. Chemosphere, 2014, 117: 59-65.

作者简介: 郝晓地(1960—), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术, 现为国际水协期刊 *Water Research* 区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2024-01-14

修回日期: 2024-01-21

(编辑: 丁彩娟)

精打细算用好水资源, 从严从细管好水资源