

# 基于 MBR 的一体化处理装置在农村污水处理中的应用研究进展

李云, 李松, 刘平, 王琛, 刘勇丽, 王斌, 陈盛\* (生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

**摘要** 综述了一体化污水处理装置, 重点介绍了基于 MBR 的一体化处理装置核心技术工艺; 概述了 MBR 工艺的研究现状, 以及 A/O-MBR、A<sup>2</sup>O-MBR、FMBR 及其他 MBR 核心工艺的一体化处理装置在农村污水处理中的应用现状; 最后对基于 MBR 的一体化处理装置今后研究方向进行了展望。

**关键词** 一体化污水处理装置; 农村污水; 膜生物反应器(MBR); 应用

中图分类号 X703 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)23-0044-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.23.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

## Research Progress of Application of MBR-based Integrated Treatment Device in Rural Sewage Treatment

LI Yun, LI Song, LIU Ping et al (Technical Centre for Ecology and Environment of Soil, Agriculture and Rural Areas, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012)

**Abstract** This paper summarized the integrated wastewater treatment device, focusing on the core technology of the integrated treatment device based on MBR. The research status of MBR process was briefly summarized, and the application status of integrated treatment units of A/O-MBR, A<sup>2</sup>O-MBR, FMBR and other MBR core processes in rural wastewater treatment was introduced. Finally, the future research direction of MBR based integrated wastewater treatment device was prospected.

**Key words** Integrated wastewater treatment device; Rural wastewater; MBR; Application

农村生活污水治理是全面建设绿色宜居新农村的重要内容, 关系到广大农民的获得感和幸福感, 党和国家对此高度重视。近年来, 国家出台了一系列政策。2018年1月, 中共中央、国务院发布《中共中央国务院关于实施乡村振兴战略的意见》, 提出“加强农村突出环境问题综合治理”。2月, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《农村人居环境整治三年行动方案》(以下简称《行动方案》), 提出“梯次推进农村生活污水治理。根据农村不同区位条件、村庄人口聚集程度、污水产生规模, 因地制宜采用污染治理与资源利用相结合、工程措施与生态措施相结合、集中与分散相结合的建设模式和处理工艺。”2018年9月住房和城乡建设部和生态环境部联合颁布了《关于加快制定地方农村生活污水排放标准的通知》, 各地正式启动相关标准的制修订工作。截至目前, 全国有29个省(市)已经发布农村污水处理设施水污染物排放标准正式稿或征求意见稿, 强化了农村污水管控和治理。一体化处理装置由于具有占地面积小、出水水质好、易维护等优势, 在分散式农村污水处理中受到广泛关注。笔者综述了 MBR 一体化处理装置的研究及其在农村生活污水治理中的应用现状, 以期在农村污水治理模式及技术选择提供决策参考。

### 1 一体化农村污水处理装置

目前农村污水处理有3种模式, 即接入城镇污水处理管网、集中处理和分散处理。由于我国农村面大地方广, 各种地理地势条件差别较大, 从国家层面开始重视分散式农村污水处理模式, 建议对人口较少、居住分散、不宜建设管网的村庄, 可以建成分散式污水处理设施。农村地区污水常见的分

散式农村生活污水处理工艺包括化粪池、人工湿地、生态滤池、土壤渗滤、稳定塘、小型一体化设施等<sup>[1]</sup>。针对不同进水条件及出水要求, 有时单一生物或生态处理不好, 往往将生物工艺或生态工艺结合, 或多级串联, 提高污水处理效能。常规生物处理或生态处理也存在一些问题, 如易堵塞、占地面积大、污染物去除效果有限、运行维护有难度等。

小型一体化处理装置由较为成熟的生化处理技术组合而成, 将预处理、生物处理、深度处理、沉淀及消毒等工艺集成到一个反应器, 具有占地面积小、污水处理效率高、出水稳定、运行成本低、易管理等优点, 在农村地区分散式污水处理中应用较广泛。目前一体化污水处理装置核心处理工艺或技术主要有 A/O、MBR、MBBR 及其他组合工艺。

**1.1 A/O 工艺** A/O 一体化装置包括厌氧-好氧一体化反应器、厌氧-接触氧化一体化等。A/O 工艺多采用推流式或往复式结构, 污水依次经过厌氧段、好氧段, 部分好氧污水回流至厌氧段, 不需要额外增加碳源即可完成反硝化反应。该工艺耐冲击能力强, 能很好地去除总氮和总磷, 出水水质好, 易管理。

**1.2 MBR 工艺** 膜生物反应器(MBR)是将传统活性污泥法与膜分离技术结合的一种处理技术。膜一方面起到全部截留活性污泥微生物的作用, 提高活性污泥浓度, 替代了原有二沉池的功能, 减少占地面积, 另一方面可以更高效地截留悬浮物, 对悬浮物去除效果好。MBR 耐冲击负荷能力强, 基本无污泥膨胀问题, 剩余污泥量少, 降低成本<sup>[2-3]</sup>。

**1.3 MBBR 工艺** 移动床生物膜反应器(MBBR)是从意大利引进的一种微动力、低能耗技术, 主要由反应器主体、旋切式微泡曝气机和悬浮生物填料几部分组成。反应器投加高性能填料, 密度比水小, 处理污水时呈悬浮状态。填料上供微生物附着生长, 形成高效生物膜, 提高污水处理效率。通过曝气, 悬浮填料在反应器中摩擦和碰撞, 降低溶氧气泡大

**基金项目** 十三五国家重点研发计划项目“乡村厕所系统技术集成与应用”(2018YFD1100505)。

**作者简介** 李云(1987—), 女, 湖北荆州人, 副研究员, 博士, 从事水处理技术及资源化利用研究。\*通信作者, 工程师, 从事环境管理工作。

**收稿日期** 2020-05-05

小,提高氧气利用率,降低曝气能耗<sup>[4]</sup>。但 MBBR 工艺相比于 MBR 或 A<sup>2</sup>O,对 P 的去除较差,需要辅助其他方法除磷。

## 2 基于 MBR 的一体化污水处理装置

由于一体化 MBR 工艺出水效果好、占地面积小、运行维护简单等优点,目前我国农村地区应用较多。在普通 MBR 工艺基础上,近年来不断开发出强化脱氮除磷一体化 MBR 工艺,如间歇循环活性污泥(ICAS)-MBR、MUCT-MBR 和 Post-反硝化膜反应器(DNMBR)等<sup>[5]</sup>。接下来重点介绍常见的基于 MBR 的一体化污水处理装置情况,主要模式包括 A/O-MBR、A<sup>2</sup>O-MBR、FMBR 及其他组合工艺等。

**2.1 A/O-MBR** 将膜组件加入 A/O 反应器中,替代二沉池节省了占地面积。2 种工艺的结合进行互补,膜的加入提高了反应器中的污泥浓度,A/O 工艺的反硝化预处理能提高 MBR 反硝化能力。A/O-MBR 或者多级 A/O-MBR 一体化装置通过排泥达到除磷目的,但该工艺整体反硝化除磷能力有待提升,当对出水总磷要求较高时需要辅助化学除磷<sup>[6]</sup>。

**2.2 A<sup>2</sup>O-MBR** A<sup>2</sup>O-MBR 反应器被分隔成 4 个区,分别是厌氧池、兼氧池、好氧池和 MBR 池(图 1),工艺流程依次是进行微生物系统的氨化和厌氧释磷、反硝化、硝化和污泥吸磷,是目前较成熟的一种一体化污水处理技术,有机物去除效率高,脱氮除磷效果好<sup>[8]</sup>。

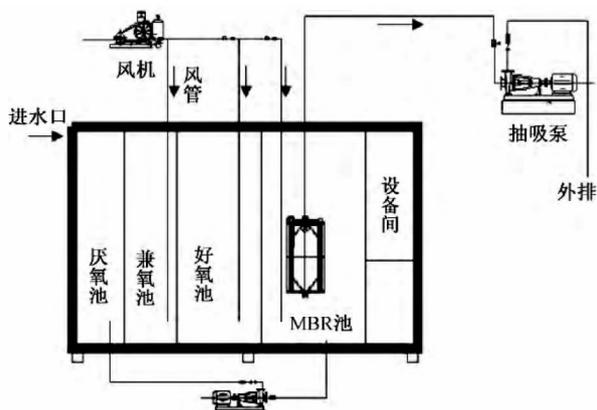


图 1 一体化 A<sup>2</sup>O-MBR 示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of integrated A<sup>2</sup>O-MBR

**2.3 FMBR** 兼氧 MBR (FMBR) 创造兼氧条件,培育大量兼氧复合菌群,降解污水中的污染物,结合 MBR 过程,能实现有机污泥基本零排放、气化除磷和同步脱氮(图 2)。该工艺设备及运行简单,运行成本低,且低碳节能,在我国农村地区应用较多<sup>[9]</sup>。

## 3 MBR 一体化装置研究现状

国内外针对 MBR 研究主要集中在新型膜材料的选择、膜材料制备优化、膜污染控制、模拟优化等方面。

**3.1 膜材料** 膜材料是膜性能的重要载体。选择及制备合适的膜材料,可以增加污染物截留率,提高膜的抗污染性能,扩大适用范围。Etemadi 等<sup>[10]</sup>将 PP/TiO<sub>2</sub> 新材料应用到 MBR 中处理含油污水,研究发现纳米材料制备的 MBR 膜抗污染性能显著提高。Pirsahab 等<sup>[11]</sup>利用亲水性聚硅氧烷(PC-A)纳米粒子和聚醚砜(PES)设计并制备了新型纳米复

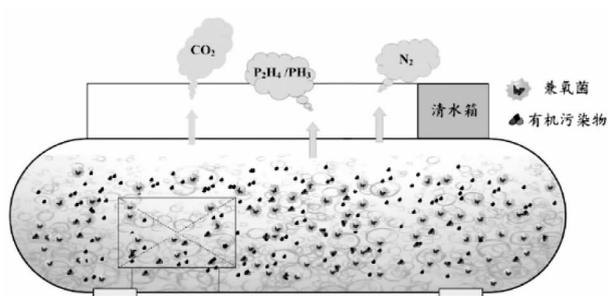


图 2 FMBR 原理示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of FMBR principle

合超滤膜,研究表明,0.5%的 PC-A 改性的超滤膜具有较高的纯水通量,改性膜亲水性强,具有较高的抗污染性能,适用于 MBR。Pandiyani 等<sup>[12]</sup>采用磺化功能化 TiO<sub>2</sub>NPs 和 TiO<sub>2</sub>NPs(STiO<sub>2</sub>) 制备改性超滤膜,提高膜抗污染性能的同时拟降低纳米粒子的抗菌活性,降低对 MBR 中细菌和微生物群落生长的影响,研究发现,PES-TiO<sub>2</sub> 和 PES-STiO<sub>2</sub> 纳米复合膜在细菌细胞活力试验中显示出 95% 的抗菌活性,适用于 MBR 材料。

**3.2 膜污染研究及控制** 膜污染是限制 MBR 应用的最主要问题之一<sup>[13]</sup>,在污水处理系统中长期存在,会降低膜的水通量,从而要求进行频繁化学清洗,不利于膜寿命保持。因此研究膜污染问题及控制策略对于提高 MBR 使用寿命、降低成本具有非常重要的意义。

有很多学者研究通过向 MBR 中添加填料的方式降低膜污染<sup>[14-15]</sup>。填料具有吸附和混凝特性,吸附作用降低了附着和进入膜孔的物质浓度,混凝作用增强了污泥的沉降性能。大量研究表明,填料的加入延长了膜过滤周期,改善了临界通量和污泥特性,能减轻膜污染,但针对不同吸附剂需要优化添加量及曝气强度。杨会会等<sup>[16]</sup>考察了 O<sub>3</sub> 和 PAC 投加对 MBR 膜污染及污泥混合液特性的影响,结果表明,O<sub>3</sub> 和 PAC 能有效吸附降低混合液中 EPS 和 SMP 浓度,改变了膜表面由 EPS 和 SMP 形成的凝胶层性质,减缓了膜污染。宋先庆等<sup>[17]</sup>研究了 A/O-MBR 一体化装置中 4 种不同孔径 PVDF 内衬膜对膜污染的影响规律,结果发现,所有孔径的膜在 MBR 系统中滤饼层和凝胶层污染比例均大于 80%,表明在实际使用过程中应该重点控制滤饼层和凝胶层的污染。Gao 等<sup>[18]</sup>研究了一体化 A/O-MBR 中微生物群落结构特征,基于微生物群落结构和代谢产物分析结果表明微生物群落演替可能是导致代谢产物不同的主要因素,也可能是导致膜污染的主要原因;研究还发现当微生物群落均匀度较低时,膜污染较轻,均匀度较高膜污染较严重。

**3.3 模拟优化** 通过优化工艺参数、曝气强度和周期、膜清洗方式等提高 MBR 污染物处理效果<sup>[19-20]</sup>。近些年越来越多的研究学者采用模型软件,实现工艺优化、膜污染控制和成本降低的目标。肖昂<sup>[21]</sup>采用 BioWin 模拟软件对一体化 A<sup>2</sup>O-MBR 反应器进行工艺模拟优化研究,建立了出水水质、总建设成本和运行成本的多目标优化模型,并通过多目标之间的权重设定,最终实现了综合优化。曹迎晨等<sup>[22]</sup>通过计

算流体力学 (CFD) 分析 MBR 平板膜中气泡的水力学特征, 以达到优化膜组件运行的目的, 研究表明, 平板膜中使用 7 mm 的膜间距能增强膜表面剪切力, 起到适当降低膜污染的作用。Schmitt 等<sup>[23]</sup> 采用人工神经网络预测 A/O-MBR 膜污染情况, 建立了相关模型, 结果表明, 模型与实际拟合度能达到 0.85, 能很好地预测该系统中膜污染情况。

#### 4 MBR 一体化装置在农村污水处理中的应用现状

Faria 等<sup>[24]</sup> 采用厌氧混合污泥床和膜生物反应器 EGSB-MBR 工艺来去除生活污水中的持久性污染物, 如普瑞德尼松、非诺贝特、倍他米松和氯雷他定等药物, 结果表明, 该系统对几种药物的去除率大于 84%, 对 COD 的去除率达到 98% 以上。

Wang 等<sup>[25]</sup> 设计了 A<sup>2</sup>O-MBR 系统处理某社区生活污水和雨水, 结果表明, COD 负荷、BOD/COD 和 COD/TN 比例是影响污染物去除的关键因素, 低温条件下, 膜污染加剧; 经过一年多的运行和调试, 该系统对 COD、BOD<sub>5</sub>、TN、TP 的去除率分别达 83.7%、91.6%、69.0% 和 74.5%, 出水能达到景观用水回用标准和直接排放标准, 投资和运行成本约 0.406 美元/t 水; 该系统能实现约 60% 回用, 该技术在集中农村社区污水处理及循环利用中具有技术和经济的可行性。杨卫等<sup>[26]</sup> 采用倒置 A<sup>2</sup>O-MBR 一体化装置处理太湖流域某农村生活污水, 厌氧区和缺氧区进水比例为 7:3, 膜池污泥龄为 15 d, 连续运行情况下对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、SS 的去除率分别达 92%、96%、95% 和 97%, TN 和 TP 去除率分别为 71% 和 88%, 能达到设计出水标准 (一级 A 标准), 工程运行费用 0.9 元/m<sup>3</sup>。谢晴等<sup>[27]</sup> 在四川德阳市某农村开展了 A<sup>2</sup>O-MBR 一体化工艺生活污水 (含厕所废水) 处理示范研究, 该系统采用了改性超滤膜, 在传统 A<sup>2</sup>O-MBR 设备基础上集成了“超声波在线膜清洗技术”和“PLC 自动控制及远程控制”, 示范研究表明, 该系统出水能稳定达到 GB 18918—2002 中一级 A 标准, 每年还能产生回用水 1 825 m<sup>3</sup> 进行农田灌溉和渔业养殖等, 环境效益和社会效益较好。

梁珊等<sup>[27]</sup> 采用氧化沟/MBR 一体化装置 (图 3) 处理村镇生活污水, 膜区采用的是聚偏氟乙烯中空纤维膜, 为了保证除磷效果, 采用投加硫酸亚铁辅助除磷; 经过 3 个月的连续运行, 该装置在水力停留时间 13.62 h、污泥龄 30 d, 进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 浓度分别为 345.5、212.6、28.9、44.1 和 4.5 mg/L 条件下, 出水 TP 能达到一级 B 标准 (投药能达到一级 A 标准), 其他指标稳定达到一级 A 标准。

郭海林等<sup>[28]</sup> 设计了 A/O-MBR 一体化装置处理山东某餐饮、冲厕和洗涤农村生活污水; MBR 区回流比为 3:1, 膜通量 12.5 L/(m<sup>2</sup>·h), 膜池在运行时采用气体增强吹扫和反洗来延缓膜污染; 整套装置采用模块化设计, 应用 PLC+触摸屏自动控制运行; 工程实际运行表明, 在进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、SS 浓度分别为 367.5、200.0、27.1 和 143.6 mg/L 情况下, 出水浓度能分别达 45.5、6.0、3.4 和 1.1 mg/L, 达到设计出水标准。付丽霞等<sup>[29]</sup> 设计了一体化水解酸化-接触氧化-MBR 反应器在实验室条件下处理农村生活污水, 水解酸化

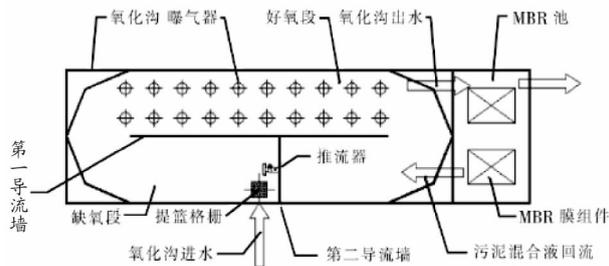


图 3 氧化沟/MBR 一体化装置示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of the oxidation ditch/MBR integrated device

与生物接触氧化反应器由 PVC 制成, 膜生物反应器为中空纤维膜, 膜过滤时间和反冲洗时间分别是 100 和 4 min; 经过污泥驯化和系统进水调试, 该系统运行 90 d 后, 出水 COD、NH<sub>3</sub>-N、SS 和 TP 能达到 DB 13/2171—2015 一级 A 标准和 GB 18918—2002 中的一级 A 标准, 设备运行稳定。

#### 5 建议

我国农村水污染防治底子薄, 农村面广、基数大、相对经济基础差, 专业技术人员较缺乏, 要结合农村实际气候、地理、经济、土地、运维管理、污水排放标准及去向等问题综合考虑治理技术及设备。从实际应用案例来看, 基于 MBR 的一体化处理装备由于具有设备集中、占地面积小、抗冲击负荷、出水水质好、稳定、运行管理方便、能耗低等多方面的优势, 在农村生活污水治理方面受到广泛关注。未来, 基于 MBR 的一体化设备在以下几个方面要继续开展深入的研究: ①高性能膜材料的研究及制备, 提高对新型、持久性、微量污染物的截留率, 进一步保证出水水质; 强化膜的抗污染性能, 延长膜的使用寿命, 降低成本。②从理论层面到工艺控制策略等方面全面深入研究膜污染机理、形成机制及控制对策。③真正高效、投资小、运行费用低、易管护的 MBR 与其他工艺高度集成的一体化装置的研发。④ MBR 一体化装置长效运行及管护机制研究, 保证装置能长期有效的运行, 发挥其功能。

#### 参考文献

- [1] 贾小宁, 何小娟, 韩凯旋, 等. 农村生活污水处理技术研究进展 [J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 22-26.
- [2] IORHEMEN O T, HAMZA R A, TAY J H. Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Membrane fouling [J]. Membranes, 2016, 6(2): 1-29.
- [3] NEOH C H, NOOR Z Z, MUTAMIM, N S A, et al. Green technology in wastewater treatment technologies: Integration of membrane bioreactor with various wastewater treatment systems [J]. Chemical engineering journal, 2016, 283: 582-594.
- [4] 周大为, 周康根, 陈伟, 等. 移动床生物膜反应器挂膜影响因素研究进展 [J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 16-20.
- [5] ZHANG H M, WANG X L, XIAO J N, et al. Enhanced biological nutrient removal using MUCT-MBR system [J]. Bioresource technology, 2009, 100(3): 1048-1054.
- [6] 梁凤葵. 污水一体化设备在村镇污水处理中的应用进展 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(7): 25-27.
- [7] 谢晴, 张静, 麻泽龙, 等. A<sup>2</sup>O-MBR 工艺在农村生活污水处理中的示范 [J]. 环境工程, 2016(7): 38-41.
- [8] MERÉNYI G, LIND J, NAUMOV S, et al. Reaction of ozone with hydrogen peroxide (peroxide process): A revision of current mechanistic concepts

- based on thermos kinetic and quantum-chemical considerations[J]. Environmental science & technology, 2010, 44(9):3505-3507.
- [9] 江西金达莱环保股份有限公司. 兼氧 FMBR (4S-MBR) 生活污水处理及回用技术[J]. 中国环保产业, 2013(10):15-19.
- [10] ETEMADI H, FONOUNI M, YEGANI R. Investigation of antifouling properties of polypropylene/TiO<sub>2</sub> nanocomposite membrane under different aeration rate in membrane bioreactor system[J/OL]. Bioresource technology, 2020, 25 [2010-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.e00414>.
- [11] PIRSAHEB M, FARAHANI M H D A, ZINADINI S, et al. Fabrication of high-performance antibiofouling ultrafiltration membranes with potential application in membrane bioreactors (MBRs) comprising polyethersulfone (PES) and polycitrate-Alumoxane (PC-A)[J]. Separation and purification technology, 2019, 211:618-627.
- [12] PANDIYAN R, AYYARU S, AHN Y H. Non-toxic properties of TiO<sub>2</sub> and STiO<sub>2</sub> nanocomposite PES ultrafiltration membranes for application in membrane-based environmental biotechnology[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2018, 158:248-255.
- [13] ASLAM M, AHMAD R, KIM J. Recent developments in biofouling control in membrane bioreactors for domestic wastewater treatment[J]. Separation and purification technology, 2018, 206:297-315.
- [14] IORHEMEN O T, HAMZA R A, TAY J H. Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials[J]. Bioresource technology, 2017, 240:9-24.
- [15] ZHOU L J, YE B, XIA S Q. Assessment of membrane bioreactor fouling with the addition of suspended aluminum nitride nanoparticles[J/OL]. Chemosphere, 2019, 237 [2020-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124473>.
- [16] 杨会会, 刘宏菊, 高冰, 等. 臭氧-活性炭投加对 MBR 混合液特性及膜污染的影响研究[J]. 环境工程, 2017, 35(6):54-58.
- [17] 宋先庆, 周杰, 刘飞, 等. 基于小孔径 PVDF 内衬膜 A/O-MBR 膜污染分析[J]. 水处理技术, 2020, 46(1):38-42.
- [18] GAO D W, WEN Z D, LI B, et al. Microbial community structure characteristics associated membrane fouling in A/O-MBR system[J]. Biore-source technology, 2014, 154:87-93.
- [19] 袁星, 杨敏, 罗南, 等. 一体式 A<sup>2</sup>O-MBR 内的 DO 分布模拟及影响因素研究[J]. 膜科学与技术, 2016, 36(1):61-71.
- [20] KIMURA K, UCHIDA H. Intensive membrane cleaning for MBRs equipped with flat-sheet ceramic membranes: Controlling negative effects of chemical reagents used for membrane cleaning[J]. Water research, 2019, 150:21-28.
- [21] 肖昂. 基于 ASM 的一体化膜生物反应器工艺模拟与多目标优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [22] 曹迎晨, SONNENBURG A, URBAN W. MBR 平板膜中气泡运动的水力特征的数值分析[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2):414-422.
- [23] SCHMITT F, BANU R, YEOM I T, et al. Development of artificial neural networks to predict membrane fouling in an anoxic-aerobic membrane bioreactor treating domestic wastewater[J]. Biochemical engineering journal, 2018, 133:47-58.
- [24] FARIA C V, RICCI B C, SILVA A F R, et al. Removal of micropollutants in domestic wastewater by expanded granular sludge bed membrane bioreactor[J]. Process safety and environmental protection, 2020, 136:223-233.
- [25] WANG H C, CUI D, HAN J L, et al. A<sup>2</sup>O-MBR as an efficient and profitable unconventional water treatment and reuse technology: A practical study in a green building residential community[J/OL]. Resources, conservation & recycling, 2019, 150 [2020-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104418>.
- [26] 杨卫, 李孟. 一体化装置处理农村生活污水工程设计与调试运行[J]. 中国给水排水, 2015, 31(20):93-96.
- [27] 梁珊, 于龙, 刘旭军, 等. 氧化沟/MBR 一体化装置在村镇污水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2015, 35(3):93-95.
- [28] 郭海林, 周宇松, 刘中亲, 等. 基于 MBR 的一体化装置处理生活污水实例[J]. 水处理技术, 2018, 44(11):138-140.
- [29] 付丽霞, 崔宁, 刘世虎, 等. 水解酸化-接触氧化-MBR 一体化装置处理农村生活污水[J]. 环境工程, 2018, 36(11):49-52.

(上接第 22 页)

建立的,但是影响陇西县药材种植的因素有很多,不能每种因素都考虑进去,所以相对于现实还是有差距;②模型求解结果只是为陇西县药材种植提供总体上的科学的种植方案,至于具体到各乡镇来决定具体详细的药材种植方案,还不能完全依靠该模型来规划,所以具有一定的局限性。

#### 4 小结

该研究应用 GIS 线性规划建模技术,从宏观角度研究种植域内如何规划种植区域内的土地资源,提高中草药材种植效益,可供农业主管部门参考决策。由于所建模型是确定型的线性规划模型,所以对气候天气外界环境的变化可能造成的干扰等因素没考虑进去,依靠模型求解得到的总体种植方案刚性有余,柔性不足,还有待于继续从随机规划(如模糊规划等)方向进行深入研究。

#### 参考文献

- [1] 晋小军,任应宗,张欣咏,等. 甘肃主产大宗中药材产业链经济效益比较分析[J]. 甘肃农业, 2013(21):24-29.
- [2] 陈慧玲,张翀叶,孙庐山,等. 湖北省杨树林下药材种植技术及效益分析[J]. 湖北林业科技, 2015, 44(1):9-12, 52.
- [3] 密余华. 林下药材种植存在的问题及发展对策[J]. 北京农业, 2015(18):52.
- [4] 郭兰萍,吕朝耕,王红阳,等. 中药生态农业与几种相关现代农业及 GAP 的关系[J]. 中国现代中药, 2018, 20(10):1179-1188.
- [5] 王忠民. 种药材如何获得好效益[J]. 四川农业科技, 2007(3):34.
- [6] 胡运权. 运筹学基础及应用[M]. 6 版. 北京:高等教育出版社, 2014:12-44.
- [7] 徐家旺,刘彬,姜波,等. 实用管理运筹学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2009:44-48.
- [8] 焦宝聪,陈兰平. 运筹学的思想方法及应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2008:54-57.
- [9] 刘满凤. 数据、模型与决策——基于 Excel 的应用与求解[M]. 北京:清华大学出版社, 2015:36-41.
- [10] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等. ArcGIS10 地理信息系统教程——从初学到精通[M]. 北京:测绘出版社, 2012:203-216.