

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.022

多介质土壤渗滤系统去除农村污水中 典型污染物的研究进展

李厚禹,徐艳,谭璐,张春雪,曹昊宇,杨波,陈咄圳,郑向群

(农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘要:多介质土壤渗滤(multi-soil-layering, MSL)系统作为低成本、易维护的农村污水处理技术成为新发展趋势。本文梳理了MSL系统的常见类型与运行原理,阐述了MSL系统去除农村污水中典型污染物的效果及其影响因素,从经济、社会与环境效益角度对MSL系统的应用现状与前景进行了评估,分析了其处理农村污水的优劣势与限制因子。指出应进一步优化MSL系统工艺,深入探究该系统对典型污染物的去除机制,加大其对抗生素耐药基因等新兴污染物的去除研究,为农村污水的高效处理与利用提供理论基础与技术支持。

关键词:多介质土壤渗滤系统;农村污水;限制因素;典型污染物;新兴污染物

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0156-10

Research progress on removal of typical pollutants from rural sewage by multi-soil-layering system//LI Houyu, XU Yan, TAN Lu, ZHANG Chunxue, CAO Haoyu, YANG Bo, CHEN Peizhen, ZHENG Xiangqun (*Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China*)

Abstract: Multi-soil-layering (MSL) system has become a new trend as a lower cost and maintenance-friendly technology for rural sewage treatment. This paper combs the common types and operating principles of the MSL system, and expounds the effect of the MSL system on removing typical pollutants in rural sewage and its influencing factors. The application status and prospect of the MSL system are evaluated from the perspective of economic, social and environmental benefits, and its advantages, disadvantages and limiting factors for rural sewage treatment are analyzed. It is pointed out that the MSL system process should be further optimized, the removal mechanism of typical pollutants should be deeply explored, and the removal of emerging pollutants such as antibiotic resistance genes should be increased, so as to provide theoretical basis and technical support for the efficient treatment and utilization of rural sewage.

Key words: multi-soil-layering system; rural sewage; limiting factors; typical pollutant; emerging pollutants

农村污水是指农村地区居民生活和生产过程中形成的污水,包括洗涤污水、厨房污水和厕所污水等生活污水以及部分养殖废水、作坊生产废水等生产污水^[1],其中含有大量氮、磷等营养物,表面活性剂等有机污染物以及抗生素、耐药基因、消毒副产物、微塑料、内分泌干扰物等新兴污染物质。这些污染物赋存可能导致引起人类、动植物致病的微生物和寄生虫卵等增殖扩散^[2]。我国农村生活污水年排放量约为8亿~9亿t,并且持续增加^[3],截至2019年,据《城乡建设统计年鉴》统计,全国乡级农村生

活污水处理覆盖率为33.30%^[4],大多数地区农村生活污水往往由于缺乏管理直接排入周边环境,对区域生态、自然资源和人类健康造成负面影响,已上升为严重的环境安全问题^[5-6]。彭彬等^[7]提到农村生活污水治理是改善农村人居环境、实施乡村振兴战略的重要举措和全面建成小康社会的内在要求。王宾等^[8]也提到推进农村生活污水治理是“十四五”时期推进农村人居环境整治提升的重要抓手之一,应大幅提高农村生活污水处理率,增强污水处理技术的区域适配性。因此,亟须筛选、强化适宜的农

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2021LM01)

作者简介:李厚禹(1994—),男,博士研究生,主要从事农村环境治理研究。E-mail:357643948@163.com

通信作者:郑向群(1974—),男,研究员,博士,主要从事农村环境治理研究。E-mail:zhengxiangqun@126.com

村污水处理技术,提高农村污水处理效率,促进农村人居环境整治。

目前,农村污水处理工艺主要包括集中污水处理设施、厌氧膜生物反应器、人工湿地以及高级氧化工艺等^[9]。然而,类似城市市政污水处理厂的集中污水处理设施对于人口密度较低、人口居住分散的农村地区来说是不适宜的^[10],同时缺乏专业的设施运营和后期维护^[11-12]。适宜农村地区的分散式污水处理技术以砂滤、化粪池和人工湿地为主^[13-14],而这些处理系统却存在占用土地面积大、处理效果较差的缺点^[15]。相关专家认为,农村污水必须从源头解决,治污决不能走城市集中处理的老路,污水治理技术要不断优化^[16]。曲久辉^[17]则在谈农村水环境综合治理中提出,农村污水治理要考虑简单、低耗、经济、易管理以及易利用 5 个方面。基于此,部分学者提出利用多介质土壤渗滤(multi-soil-layering, MSL)系统来解决分散式污水处理问题,其被认为是一种可用于废水处理和环境保护的创新型的生态技术,特别是在农村地区^[18-19]。与其他类型的污水处理系统相比,MSL 系统具有承载高水力负荷、成本低、对环境的适应性较强、设备维护量小、使用寿命长等优势^[20-22]。此外,MSL 系统作为传统土地渗滤处理技术的一种替代设施^[23],使用了改进的砖墙模式内部结构,提高了污染物去除效率^[24]。同时,其解决了传统土地渗滤系统易堵塞的问题,当物质积聚时,可通过间歇操作或增加液压负荷来清除堵塞,这使得 MSL 系统在运行中通常不需要反洗和再生^[25-26]。大量的实际应用证明 MSL 系统能够有效地去除生活污水^[27]、河水^[28]以及纺织废水^[29]等水体中的污染物质。然而,其对于污水污染物的稳态去除及工艺的优化筛选仍需进一步探究。现阶段,利用 MSL 系统处理农村污水的研究主要集中在优化该系统对单一污染物的去除效率,而缺乏对于 MSL 系统中复合污染物的去除规律、运行原理等方面的探究。此外,结合经济效益、社会与环境效益等方面综合评估系统运行情况也是下一步研究趋势。

1 常见的 MSL 系统类型及应用现状

1.1 垂直/水平流 MSL 系统

自 20 世纪 90 年代初以来,MSL 系统在家庭废水处理中日益流行^[22],根据该系统中的水流方向,可分为垂直流 MSL(vertical-flow MSL, VFMSL)系统和水平流 MSL(horizontal flow MSL, HFMSL)系统。其内部具有特殊的砖状结构,是由多孔渗透层(porous permeable layer, PL)较密地包围着土壤混合块层(soil-mixture-block, SMB)。其中,SMB 由土

壤、含铁/钢材料、木炭和其他能够增强除磷效果和微生物活性的材料组成,PL 则通常是由沸石、陶粒或珍珠岩填充,起到防止堵塞并增强污水的渗透与分布的作用^[30],也正是该特殊的结构,使得其与传统土壤渗滤系统相比,堵塞率下降。此外,由于结构、渗透性和水流分布的差异,SMB 和 PL 可以分别作为饱和区(厌氧区)和非饱和区(需氧区),因此,该系统是一个包括好氧和厌氧两个过程的混合反应器,同时该系统也是一个微型土壤生态系统^[31]。目前,该系统多应用于日本、泰国、美国等地,研究已初具规模,且成果显著^[32]。近年来,国内研究正从初始阶段迈向发展阶段,部分学者开始关注该系统的应用,然而对于该系统处理污染物的研究仍不够全面,在实际工程的建设和应用方面亦缺乏数据支撑。

1.2 基于人工湿地的 MSL 系统

从技术角度来看,人工湿地与 MSL 系统都是基于模拟自然过程而设计的,包括过滤、吸附、植物吸收、挥发和微生物降解沉淀,以受控的方式中和废水中的污染物,并增强填充床或填充床中的微生物活性^[24,33]。因此,有学者将二者联合形成复合系统用于处理污水,尤其在海外较为盛行。Koottatep 等^[34]开发了基于人工湿地的 MSL(MSL based on constructed wetland, MSL-CW)系统处理农村厕所连接的化粪池污水。基于此,Nguyen 等^[35]比较了人工湿地、MSL 系统以及 MSL-CW 系统处理生产污水的性能,结果发现与其他两个独立的系统相比,MSL-CW 系统对生产污水中的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总磷(total phosphorus, TP)以及总大肠杆菌(total coliforms, TC)的降解效果更优。Koottatep 等^[36]也对基于 MSL-CW 的处理性能进行了考察,结果表明基于人工湿地的 MSL 系统对化粪池污水中的 COD、超氧化物歧化酶以及生化需氧量(biological oxygen demand, BOD)的去除效果与长期运行的改良人工湿地(modified constructed wetland, MCW)相当。

1.3 含有砂滤器的 MSL 系统

长期以来,砂滤(sand filter, SF)技术在污水处理领域得到了广泛的应用^[37],其原理是利用颗粒介质对废水进行过滤处理,是一种能够满足再生水水质的有效方法。Li 等^[38]在对不同砂滤池去除氨氮(ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)和 COD 的效果研究中发现,砂滤池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率最高可达 90.68%,而对 COD 的去除率最高仅为 19.08%。Kang 等^[39]的试验则表明,SF 技术即使在高水力负荷下也能够有效地去除污水中的细菌。基于该系统的优劣势,Latrach 等^[40]在 MSL 系统末端处串联 SF 设施,构造

了含有砂滤器的 MSL-SF 系统。实际应用发现,MSL-SF 系统中砂滤器对污水中污染物的去除效率取决于水力负荷,因此为保证出水水质,推荐使用低水力负荷。

1.4 滴滤塔组合 MSL 系统

为了提高农村污水的脱氮效果,部分学者选择将滴滤塔与 MSL 系统组合处理农村生活污水。Zhang 等^[41]将垂直流滴滤塔(vertical flow trickling filter, VFTF)与 HFMSL 组合,并在不同碳氮比的进水和喷水频率下考察该装置的性能。Luo 等^[31]则构建了由铁改性沸石滴滤塔以及 MSL 系统组成的“滴滤塔 + MSL 系统”两级垂直流生物滤池系统,主要用于预处理化粪池出水,去除部分有机物、NH₃-N 等。Tang 等^[15]采用了序贯垂直流滴滤塔和 HFMSL 系统处理含有不同浓度十二烷基苯磺酸钠(sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS)的分散式生活污水。罗伟^[42]在长期试验的过程中发现,当进水力负荷为 920 L/(m²·d)并保持运行条件稳定时,该滴滤塔组合 MSL 系统的两级反应器系统的出水除总氮(total nitrogen, TN)外基本达到 GB 18918—2020《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。装置运行过程中均未发生堵塞及沟流现象,大部分污染物均在此段被截留和消化,确保了后级的稳定运行。同时,该系统运行中并不需要人工通风,对人工管理要求较少。这也是该技术低成本、易维护,适合分散式农村污水处理的原因之一。

综上所述,学者们利用各污水处理设施的优势,进行改良并联合 MSL 系统形成新的污水处理系统,进一步提高对农村生活污水中污染物的去除效率。除上述类型外,还有曝气生物滤池(biological aerated filter, BAF) + MSL 系统组合工艺、移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR) + MSL 系统组合工艺等。然而,目前国内关于此类组合工艺的研究多处于实验室模拟研究阶段,缺乏实际应用数据。因此,应推广 MSL 系统的实际应用及工程示范。

2 MSL 系统对农村污水中典型污染物的去除

由于我国农村污水具有污染物成分复杂、异质性强等特点,因此 MSL 系统对农村污水中不同污染物的去除效果存在一定的差异性。为明确 MSL 系统处理污水存在的问题,对其去除不同污染物的效果进行梳理。

2.1 MSL 系统对氮磷等营养物的去除

农村污水中氮、磷超标严重^[43-44],如果处理不当将造成水体富营养化,导致水生植物(尤其是浮游藻类)过量生长、水生生物大量死亡,加速水体衰老的过程。现阶段,已有大量研究表明,MSL 系统能够有效去除污水中的氮、磷等营养物。Luo 等^[31]将模拟化粪池流出物排入 MSL 系统处理,发现其对 TP、NH₃-N 和 TN 的总去除率分别为 92.0% ~ 94.0%、85.1% ~ 86.9% 和 58.9% ~ 63.8%,平均最终出水质量浓度分别为 0.28 mg/L、5.66 mg/L 和 21.0 mg/L。Song 等^[45]指出在运行良好的 MSL 系统中,TP 可以被完全去除,这主要是由于化学氧化反应、胶体产物和表面活性剂之间的吸附以及多孔介质上的化学沉淀。张春娣等^[46]在研究 MSL 系统对猪场废水的处理效果时则提出,基质吸附作用是 MSL 系统去除磷的主要途径。另一项研究在对 MSL 系统处理农村生活污水的性能评价和因子分析时发现,该系统对 TP 的去除率保持在 97.97% ~ 100% 的较高水平,表现较好的 MSL 系统对 NH₃-N 的去除率可达 89.96% ~ 100%^[47]。Koottatep 等^[48]研究结果显示 MSL 装置对于黑水中 TN 和 TP 的去除率分别为(95 ± 3)% 和(88 ± 15)%。宋颖等^[49]的研究发现,MSL 系统对 TP、TN、NH₃-N 和硝态氮(nitric nitrogen, NO₃⁻-N)的平均去除率分别为(68.14 ± 3.51)%、(40.79 ± 3.10)%、(42.68 ± 2.90)% 和(54.19 ± 5.15)%,均高于潜流式人工湿地的处理效果。此外,由于高浓度的悬浮物会导致污水处理设施堵塞(例如渗滤池)问题,因此总悬浮颗粒物的去除也是污水处理的重要内容^[50-52]。Nguyen 等^[35]发现,相较于人工湿地,MSL 系统对污水中的总悬浮颗粒物去除效率较高,可达 80.49%。由此可见,MSL 系统对氮磷等物质的去除效果普遍较好,尤其是对磷的去除,其存在的差异主要是由于 MSL 系统中填料特性差异造成的,因此筛选合适填料将是下一步保证 MSL 系统对无机污染物高效稳定去除的主要手段。

2.2 MSL 系统对有机污染物的去除

研究表明,污水经 MSL 系统处理后,COD、BOD 以及总悬浮颗粒物的最终质量浓度分别为 30.2 mg/L、8.1 mg/L 和 1.2 mg/L,出水水质达到了 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》排放要求^[53]。Tang 等^[15]利用滴滤塔联合 MSL 系统处理含有不同浓度 SDBS 的生活污水,研究发现 COD 的去除率可达到 92.1%。Hong 等^[19]指出在复杂的环境条件下,MSL 系统在污水处理中具有稳定良好的性能,COD 的最高降解率达到了 98.29%。由此可见,

MSL 系统对于污水中的有机污染物具有较好的去除效果,但对于含有高浓度有机污染物的污水,其处理效率有待提高。因此,应以污水污染负荷为变量,深入探究 MSL 系统在不同污染负荷下污水处理效能差异的微观机理,以此为依据筛选优化 MSL 系统。

2.3 MSL 系统对新兴污染物的去除

大量研究表明,污水中残留的新兴污染物,例如抗生素、耐药基因、内分泌干扰物等,均不同程度影响生态及人体健康,为此对污水处理提出了更高的要求^[54]。Song 等^[45]的研究结果表明,MSL 系统对磺胺甲恶唑(sulfamethoxazole, SMX)的去除性能稳定,去除率最高可达 91%,同时推理 MSL 系统对 SMX 的去除机制可能为非生物吸附过程,生物效应可能是基于条件刺激的辅助机制。特别是 MSL 系统的上层部分在 SMX 吸附去除中起主要作用。此外,残留在水环境中的微塑料,可能会释放出有毒的增塑剂,或者由于其表面特性可能会吸附有毒成分,从而导致疾病产生、进化抑制和水生动物死亡,并通过食物链威胁人类健康^[55]。然而,目前对利用 MSL 系统去除农村污水中微塑料、耐药基因、内分泌干扰物等新兴污染物的定量研究与机制方面研究均较为缺乏。

2.4 MSL 系统对致病菌的去除

污水中含有大量的病原微生物,如沙门氏菌可能导致伤寒、败血病、急性肠胃炎等,志贺氏菌可能导致痢疾,弧形大肠杆菌曾在 1988 年引起细菌性痢疾的暴发。尤其是在经历了欧美“军团病”“贾第虫病”“隐孢子虫病”和我国“非典”“禽流感”等大规模病毒传染事件之后,人们对回用水的安全卫生问题特别关注^[56]。为了更好地预测 MSL 系统出口处的 TC,开发了神经网络模型,与线性回归相比,神经网络显示出优异的结果。并通过神经网络模型进行了各预测因子的重要性分析,发现酸碱度和总悬浮颗粒物对 TC 的去除影响最大^[27]。Latrach 等^[57]在探究 MSL 系统对致病菌的去除作用中发现 *Staphylococcus* sp. 的去除率最佳,大肠杆菌最低($10^{1.01}$ 个)。随后,Latrach 等^[18]在干旱气候条件下,串联了两个 MSL 系统去除农村生活污水中大肠菌群和人类病原体,结果发现生活污水经两个 MSL 系统后,粪便细菌指标和致病菌的数量降低了 $10^{2.21} \sim 10^{3.15}$ 个。Eturki 等^[58]也指出利用两段 MSL 系统消除人类致病菌细菌的效果优于利用渗滤处理,可去除约 $10^{0.7}$ 个粪便大肠杆菌。

综上所述,与常规污染物类似,MSL 系统是消减农村污水中新兴污染物以及致病菌的有效措施。

然而,现阶段基于 MSL 系统去除农村污水中新兴污染物与致病菌的研究较少,相关消减规律与机制仍需进一步探究。

3 影响 MSL 系统作用的因素

MSL 系统去除污染物是一个复杂的过程,包括沉淀、过滤、吸附和生物降解等过程,涉及多种化学、物理和生物机制及其协同效应^[41]。因此,从化学、物理和生物 3 个方面对影响 MSL 系统去除典型污染物的因素进行分析,同时从环境因素、污水特性、设施参数以及生物作用 4 个角度进行梳理。

3.1 环境因素

温度通常被认为是污水处理系统中影响去除大肠杆菌的一个重要因素^[59]。Sbahi 等^[27]基于神经网络预测发现 MSL 系统对污水中大肠杆菌的去除率在温暖与寒冷季节存在显著差异。然而,近期的研究却发现季节和气温波动对 MSL 系统处理效率的影响并不显著^[18]。这是由于 MSL 系统的构筑材料能够缓解、削减季节更替带来的气温变化。这也体现了 MSL 系统能够减少普通污水处理设施因冬季寒冷而无法正常运转的技术弊端。此外,虽然该研究表明 MSL 系统对污染物的去除过程更多地依赖于系统内部结构而不是外部环境因素。但笔者认为,光照、MSL 系统湿度、建设深度等因素也可能影响 MSL 系统运行效果,然而目前此方面研究尚且缺乏。

3.2 污水特性

污水质量是影响 MSL 污染物去除效果的最重要因素,是设计 MSL 系统时需要考虑的关键参数。例如,pH 值是影响化学除磷过程和含磷化工产品形态的关键参数,Song 等^[45]的研究表明,高 pH 值进水能显著提高 TP 的去除率,高酸性环境将直接导致最终磷酸盐的二次释放;同时,对于磺胺甲恶唑,酸性进水则比碱性进水更有利于该物质的去除。此外,吴浩恩等^[60]在相同表面水力负荷条件下发现,水温的降低会直接降低 MSL 系统的脱氮效率。当水温从平均 19℃ 下降到低于 15℃ 时,两种共混固相碳源的 MSL 系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的平均去除率分别下降 8% ~ 10% 和 17%。Li 等^[61]的研究则表明进水 COD 与 TN 浓度比值(C/N)是影响土壤渗滤系统硝化、反硝化过程的一个重要因素。较低的 C/N 值表明有机物不充足,会影响反硝化过程中反硝化细菌的活性,该问题可通过补充固定碳源提高 C/N 值。但是,C/N 值的增加会引起生物量和碳水化合物含量的增加,导致土壤渗透系数降低,抑制硝化过程的进行^[62]。因此,污水进水量、污染特性对 MSL

系统处理复合污染污水的作用效果至关重要,应以掌握地区污水特性为前提建设 MSL 系统,达到因地制宜处理污水的目的。

除此之外,污水流的运动特性也是影响 MSL 系统消减污染物的因素之一。严森^[63]在 BAF-多级土壤渗滤系统组合强化脱氮除磷的研究中发现,不同停留时间对 MSL 系统脱氮效果也有较大影响,当停留时间为 120 min、90 min 时系统对 TN 去除率能达到 80% 以上,当停留时间为 60 min、30 min 时,系统对 TN 的去除率迅速降低至 50% ~ 60%。因此,稳态处理农村污水是提高污水处理效率的重点问题之一,需进一步研究 MSL 的耐冲击能力。

3.3 设施参数

合适的填物理化性质,如渗透性、氮磷吸附性、硝化反硝化潜力等,是 MSL 系统正常运行和高效脱氮除磷的关键,因此,MSL 系统基质填料的选择至关重要^[64-65]。其中,PL 中的多孔沸石是大多数好氧细菌形成生物膜的场所,可以促进污水和系统中的氧消耗,从而提高 SMB 中厌氧环境的反硝化作用^[10]。另一方面,Srinandan 等^[66]的研究发现用于 NO_3^- -N 生物转化的反硝化微生物的活性不仅取决于 SMB 的厌氧环境条件,还依赖于 SMB 中高效、持久的碳源填料。吴浩恩等^[60]向缺氧段模块中添加传统碳源木屑(MSL1)以及一种基于聚羟基丁酸戊酸酯(polyhydroxybutyrate, PHB)(MSL2)的共混固相碳源,并进行脱氮效率对比,结果表明,整个运行过程期间不同条件影响下,添加新型固相碳源的 MSL2 比 MSL1 表现出更好的强化脱氮性能。李丹等^[65]通过 Langmuir 方程拟合发现,红黏土、粉煤灰及活性炭对磷的理论饱和和吸附量较大,沸石及红黏土对 NH_3 -N 的吸附能力较强,其中经过实际应用后,红黏土混合质量分数为 20% ~ 40% 的活性炭或煤渣更适合作为 SMB 填料。同时,填料差异对有机物的去除效果也具有显著影响。徐显等^[67]在研究生物炭对 MSL 系统处理农村生活污水效果的研究中发现,稻壳生物炭作为填料时,对 COD 的去除率分别是木屑、稻秆的 1.01 倍和 1.2 倍。而 Khalifa 等^[68]则选择当地易得的火山灰、大理石废料、木炭与 MSL 标准填料比较各自处理污水的效果,结果发现标准填料与火山灰均未发现堵塞现象,火山灰对总悬浮颗粒物的去除效率最高可达 93.28%,木炭和大理石填料对 TP 的去除效率最优,仅火山灰对 TC 具有较好的去除效果。此外,Song 等^[47]研究表明,在 MSL 系统运行过程中,曝气有利于去除污水中的有机物、TP 和 NH_3 -N,但充氧环境却不利于 NO_3^- -N 的去除。Guo 等^[69]则发现在 MSL 系统的水

力负荷由 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增加至 $200 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的过程中,当水力负荷为 $160 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, NH_3 -N、TN 和 TP 的去除率最大,分别为 94.2%、94.4% 和 92.5%。叶海等^[70]的研究发现,表面负荷减小、水力停留时间延长可显著提高 MSL 系统对 COD、 NH_3 -N、TN、TP 的去除效果,在 $800 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的表面负荷下,出水 COD、 NH_3 -N、TP 浓度达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的 IV 类标准。各污染指标受表面负荷影响的强弱程度排序为 NH_3 -N、TP、COD、TN。这是由于相对较低的进水水力负荷,保证了较长的水力停留时间,进而加强好氧段中的好氧/异养型微生物的新陈代谢,使得有机污染物得到有效分解^[71]。鉴于此,MSL 系统运行参数的优化能够有效地强化污水中污染物的消减效率,但对于参数改变影响 MSL 系统内部的物理-化学-生物机制仍需进一步探究。

3.4 生物作用

土壤作为 SMB 的主要成分,是复杂微生物的栖息地,而微生物与污水中污染物的去除和转化密切相关^[72]。土壤微生物群不是一成不变的,它们可能随着周围环境的变化而改变^[73]。郭俊元等^[74]在解析 MSL 对有机物和氮磷的去除途径时发现,MSL 系统运行中的微生物降解和转化作用对污水中 COD、 NH_3 -N 和 TN 的去除贡献率最大。沈聚^[32]的研究发现,各 MSL 系统通水层沸石在经过一段时间的污水处理后,其比表面积、孔体积和孔径出现了不同程度的减小。引起沸石表面性质和形态变化主要是多糖、蛋白质类高分子聚合物,其成分与引起系统堵塞的不明大块黏稠状物质相近,主要为系统内微生物的胞外聚合物。此外,宋颖^[75]在稳定运行 2 年的示范工程中的反应器样品检测中发现,具有降解功能的拟杆菌门细菌主要分布在 MSL 系统 PL 上层中,从而解释了 COD 大部分在 MSL 系统表层被去除的原因。同时在系统内发现存在含 *nirK* 和 *nirS* 两类反硝化功能基因的菌群,说明系统内存在多种脱氮途径。而反硝化功能基因大部分在 MSL 系统中 SMB 中被检测到,*amoA* 基因只在 SMB 中检测到,*nxB* 只在 PL 中层检测到,说明系统内氨氧化与反硝化反应可能主要发生在 SMB 中,而亚硝酸盐氧化可能主要发生在 PL 中层。由此可见,微生物可能是驱动 MSL 系统改变污水中典型污染物含量的主要因子,而其中的关键菌属以及微生物的作用机制仍需进一步深入探究。

综上所述,MSL 系统对污水的处理效能受到物理-化学-生物作用的共同影响,而现阶段的系统强化研究方式较为单一。因此,在明确不同影响因素

对MSL系统处理污水的影响作用后,应采用响应面曲线或拉丁方正交优化等方法,对MSL系统做出工艺参数的组合优化,以提高污水处理效率。此外,不同影响因素对MSL系统处理污水效率的作用机制仍需进一步探究,从微观角度优化工艺。例如,上文提到MSL堵塞是由于沸石表面的蛋白质类高分子聚合物的产生,在后续研究中则可深入探究如何调整微生物菌群结构减少该类物质的产生,降低堵塞率。

4 MSL系统处理农村污水的应用前景

4.1 经济效益

从MSL系统的建设成本分析,其主要由价值低廉或者废弃可回收的材料组成,如土壤、沸石、锯末、铁粉等,在农村地区容易获得^[27]。SMB内部的土壤在处理过程中起着重要的作用。而组成PL的岩石颗粒(砾石、沸石和珍珠岩)的选择取决于当地存在的岩石类型^[76]。因此,就地取材可以实现MSL系统的低投入成本^[77]。同时,废弃物作为SMB填料能够提高农村废弃物的资源化利用率。此外,基于农村污水的分散型及复混型的特点,可分散建设的MSL系统能够更便宜地处理分散式农村污水,避免了污水集中收集铺设管道产生的经济压力,并解决因农村地区基础设施建设薄弱引起的施工困难问题。

4.2 社会与环境效益

从MSL系统的实用价值分析,与其他农村污水处理设施相比,MSL系统可根据实际使用需求进行构造。例如,若有景观需求即可采用基于人工湿地的MSL系统;若无景观需求,则可选用单一的MSL结构埋于地下,与人工湿地相比,可解决占地面积大的问题,更节省空间。而与传统的土壤渗滤系统相比,MSL系统密闭的设备结构及处理废水的回收功能能够有效地避免污水渗入地下水,降低污水中残留污染物对地下水的污染风险。此外,MSL系统回收的处理废水可进行中水回用,应用于农作物种植灌溉,有效地提高了水资源循环利用效率,解决部分农村水资源短缺的问题。

5 结语

农村污水处理作为我国农村人居环境整治工作的重点任务之一,应形成低成本、易维护、处理效果好、稳定达标的污水处理技术模式,同时能够在提高生活污水的回用率方面有所突破。本文综述了利用MSL系统对农村污水中典型污染物的去除研究及应用前景,明确了MSL系统的运行机制,归纳了不

同污染物在MSL系统中的降解去除规律及影响该系统运行、处理效率的关键因子,希望能为我国农村污水处理提供可参考、可推广的技术模式。总体而言,目前MSL系统处于工艺突破阶段,而利用MSL系统处理农村生活污水中污染物的研究大多集中在无机营养物质的去除。同时,不同因子对MSL系统的影响作用多停留在现象描述,对于机制的深入研究较为缺乏。后续对利用MSL系统处理农村生活污水的研究应着重关注以下方面:

a. 从区域适配性、经济效益、社会效益等方面出发,综合评估MSL系统在农村污水处理中的应用价值,进一步优化MSL系统工艺,提高其对复杂污染物的去除效率,降低设施建造和运行管护成本,为农村污水的高效处理与利用提供技术支撑。

b. 深入探究MSL系统对典型污染物的去除机制,找准系统在不同区域对不同污染物的去除机理,为有效去除不同类型农村污水,精准改良MSL系统结构,提供理论基础。

c. 加大MSL系统对抗生素、耐药基因、微塑料以及内分泌干扰物等新兴污染物的去除研究,明确该系统对新兴污染物的处理效果,减少持久性污染物在农村生产生活系统中的传播扩散,避免对人体健康造成危害。

参考文献:

- [1] 孔德, 张晓岚. 农村污水处理运行模式的国际经验及对我国的启示[J]. 环境保护, 2019, 47(19): 61-64. (KONG De, ZHANG Xiaolan. International experience study and suggestions on rural sewage treatment operation model in China[J]. Environmental Protection, 2019, 47(19): 61-64. (in Chinese))
- [2] HUBE S, WU B. Mitigation of emerging pollutants and pathogens in decentralized wastewater treatment processes: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146545.
- [3] 张胜祥, 张声皓, 孙云帆. 农村生活污水处理现状及处理工艺分析[J]. 工程建设与设计, 2020(24): 118-119. (ZHANG Shengxiang, ZHANG Shenghao, SUN Yunfan. Analysis on the current situation and treatment technology of rural domestic sewage [J]. Construction & Design for Project, 2020(24): 118-119. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [5] AGUILERA R, SABATER S, MARCE R. A methodological framework for characterizing the spatiotemporal variability of river water-quality patterns using dynamic factor analysis [J]. Journal of Environmental Informatics, 2018, 31(2): 97-110.

- [6] HE H, CHEN Y, LI X, et al. Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes; a review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 520-527.
- [7] 彭彬, 胡思源, 王铸, 等. 农村生活污水分散式处理现状与问题探讨[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 242-253. (PENG Bin, HU Siyuan, WANG Zhu, et al. Present situation and problems of decentralized treatment of rural domestic sewage [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2): 242-253. (in Chinese))
- [8] 王宾, 于法稳. “十四五”时期推进农村人居环境整治提升的战略任务[J]. *改革*, 2021(3): 10. (WANG Bin, YU Fawen. The strategic task of promoting the improvement of rural human settlements during the “fourteenth five year plan” period [J]. *Reform*, 2021(3):10. (in Chinese))
- [9] LI S, ZHANG C, LI F, et al. Technologies towards antibiotic resistance genes (ARGs) removal from aquatic environment; a critical review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411:125148.
- [10] SONG P, HUANG G, HONG Y, et al. A biophysiological perspective on enhanced nitrate removal from decentralized domestic sewage using gravitational-flow multi-soil-layering systems [J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124868.
- [11] KHAN U T, VALEO C. Comparing a Bayesian and fuzzy number approach to uncertainty quantification in short-term dissolved oxygen prediction [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2017, 30(1): 1-16.
- [12] 胡凯, 许航, 张怡蕾, 等. 分散式农村生活污水处理设施运营模式探讨[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 63-66. (HU Kai, XU Hang, ZHANG Yilei, et al. Study of operation modes for decentralized domestic sewage treatment facilities in rural areas [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 63-66. (in Chinese))
- [13] 张海阔, 姜翠玲, 朱立琴, 等. 盐龙湖表面流人工湿地底泥氧化层对污染物释放的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 95-101. (ZHANG Haikuo, JIANG Cuiling, ZHU Liqin, et al. Effect of oxide layer of sediment on contaminant release in surface flow constructed wetland of Yanlong Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 95-101. (in Chinese))
- [14] ZHOU Q, LIN Y, LI X, et al. Effect of zinc ions on nutrient removal and growth of *Lemna aquinoctialis* from anaerobically digested swine wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 457-463.
- [15] TANG W, LI X, LIU H, et al. Sequential vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of decentralized domestic wastewater with sodium dodecyl benzene sulfonate [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122634.
- [16] 杨方静, 郑挺颖, 刘国伟. 中国环科院夏青: 农村污水必须走就地资源化新路 [EB/OL]. (2021-04-07) [2021-04-16]. <http://www.chinacitywater.org/zwdt/hyzs/103260.shtml>.
- [17] 曲久辉. 农村水环境综合治理的标准与模式 [EB/OL]. (2010-01-10) [2021-04-16]. <https://www.h2o-china.com/news/286155.html>.
- [18] LATRACH L, OUZZANI N, HEJJAJ A, et al. Two-stage vertical flow multi-soil-layering (MSL) technology for efficient removal of coliforms and human pathogens from domestic wastewater in rural areas under arid climate [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, 221(1): 64-80.
- [19] HONG Y, HUANG G, AN C, et al. Enhanced nitrogen removal in the treatment of rural domestic sewage using vertical-flow multi-soil-layering systems: experimental and modeling insights [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 240: 273-284.
- [20] AN C J, MCBEAN E, HUANG G H, et al. Multi-soil-layering systems for wastewater treatment in small and remote communities [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2016, 27(2): 131-144.
- [21] LAMZOURI K, MAHI M, OUATAR S, et al. Application of multi-soil-layering technique for wastewater treatment in Moroccan rural areas; study of the operation process for an engineering design [J]. *Journal of Materials & Environmental Science*, 2016, 7(2): 579-585.
- [22] LATRACH L, MASUNAGA T, OUZZANI N, et al. Removal of bacterial indicators and pathogens from domestic wastewater by the multi-soil-layering (MSL) system [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(2): 337-346.
- [23] KHAOULA L, MUSTAPHA M, TSUGIYUKI M, et al. Wastewater treatment plant performance inside multi-soil-layering system [J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2017, 14(1): 53-59.
- [24] WEI C J, WU W Z. Performance of single-pass and bypass multi-step multi-soil-layering systems for low-(C/N)-ratio polluted river water treatment [J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 579-586.
- [25] GUAN Y, CHEN X, ZHANG S, et al. Performance of multi-soil-layering system (MSL) treating leachate from rural unsanitary landfills [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 420: 183-190.
- [26] MASUNAGA T, SATO K, MORI J, et al. Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 215-223.
- [27] SBAHI S, OUZZANI N, LATRACH L, et al.

- Predicting the concentration of total coliforms in treated rural domestic wastewater by multi-soil-layering (MSL) technology using artificial neural networks [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 204: 111118.
- [28] 陈佳利, 吴为中, 杨春平, 等. 基于BDPs的多级土壤渗滤系统处理受污染河水的试验研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 909-915. (CHEN Jiali, WU Weizhong, YANG Chunping, et al. Study of river water treatment using multi-soil-layering system based on BDPs [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 909-915. (in Chinese))
- [29] SUPRIYAD I, WIDIJ ANTO H, PRANOT O, et al. Improving quality of textile wastewater with organic materials as multi soil layering[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2016, 107(1): 012016.
- [30] CHEN X, LUO A C, SATO K, et al. An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas [J]. *Water and Environment Journal*, 2009, 23(4): 255-262.
- [31] LUO W, YANG C, HE H, et al. Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 415-423.
- [32] 沈聚. 多介质土壤层系统处理分散式农村生活污水过程的微生物多样性和理化性质分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [33] JIA L, WANG R, FENG L, et al. Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass: effect of influent C/N ratios [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 345: 22-30.
- [34] KOOTTATEP T, SUKSIRI P, PUSSAYANAVIN T, et al. Development of a novel multi-soil layer constructed wetland treating septic tank effluent with emphasis on organic and ammonia removals [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2018, 229(8): 258.
- [35] NGUYEN X C, CHANG S W, TCP T, et al. Comparative study about the performance of three types of modified natural treatment systems for rice noodle wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 282: 163-170.
- [36] KOOTTATEP T, PUSSAYANAVIN T, KHAMYAI S, et al. Performance of novel constructed wetlands for treating solar septic tank effluent [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142447.
- [37] KAUPPINEN A, MARTIKAINEN K, MATIKKA V, et al. Sand filters for removal of microbes and nutrients from wastewater during a one-year pilot study in a cold temperate climate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 133(15): 206-213.
- [38] LI S, GAO P, LYU Y. Modified bio-sand filters for advanced treatment of secondary effluent of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(9): 104-108.
- [39] KANG Y W, MANCL K M, TUOVINEN O H J B T. Treatment of turkey processing wastewater with sand filtration [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(7): 1460-1466.
- [40] LATRACH L, OUZZANI N, MASUNAGA T, et al. Domestic wastewater disinfection by combined treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL-SF): a laboratory pilot study [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 294-301.
- [41] ZHANG Y, CHENG Y, YANG C, et al. Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of rural wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193: 424-432.
- [42] 罗伟. 沸石层滴滤-多介质土壤层系统处理分散生活污水的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [43] 梅涵一, 刘云根, 梁启斌, 等. 阳宗海流域冬季典型农村污水污染特征及水质评价[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 67-73. (MEI Hanyi, LIU Yungen, LIANG Qibin, et al. Pollution characteristics and water quality evaluation of typical rural sewage in winter in Yangzonghai Lake Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 67-73. (in Chinese))
- [44] 王超, 周青, 侯俊, 等. 零价铁与微生物耦合系统强化农田排水脱氮效果研究[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 1-6. (WANG Chao, ZHOU Qing, HOU Jun, et al. Enhanced degradation of nitrogen in agricultural drainage by integrated zero-valent iron and microbiological treatment system [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 1-6. (in Chinese))
- [45] SONG P, HUANG G, AN C, et al. Exploring the decentralized treatment of sulfamethoxazole-contained poultry wastewater through vertical-flow multi-soil-layering systems in rural communities [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116480.
- [46] 张春娣, 张帅, 聂新军, 等. 多基质土壤混合层技术系统(MSL)对猪场废水的处理效果 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(3): 336-346. (ZHANG Chundi, ZHANG Shuai, NIE Xinjun, et al. Treatment of piggery wastewater using multi-soil-layering system [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science)*, 2012, 38(3): 336-346. (in Chinese))
- [47] SONG P, HUANG G, AN C, et al. Treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems: performance evaluation, factorial analysis and numerical modeling [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 536-546.

- [48] KOOTTATEP T, PUSSAYANAVIN T, POLPRASERT C. Nouveau design solar septic tank: reinvented toilet technology for sanitation 4. 0 [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 19: 100933.
- [49] 宋颖, 黄玉婷, 葛川, 等. 多介质土壤滤层系统 (MSL) 与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 [J]. 环境科学. 2014, 35 (9): 3436-3442. (SONG Ying, HUANG Yuting, GE Chuan, et al. Treatment of marine-aquaculture effluent by the multi-soil-layer (MSL) system and subsurface flow constructed wetland [J]. Environmental Science, 2014, 35 (9): 3436-3442. (in Chinese))
- [50] 武轩韵. 不同基质组合渗滤系统去除污水中总磷和氨氮研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [51] 李武朝, 汝绍锋. 污水悬浮物自动清除装置设计与仿真 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40(7): 183-188. (LI Wuchao, RU Shaofen. Design and simulation of automatic sewage evacuation device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(7): 183-188. (in Chinese))
- [52] 柯起龙. 电吸附水处理技术 (EST) 对污水悬浮物去除效果研究 [J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(4): 218-219. (KE Qilong. Study of the sewage suspended solids removal efficiency of electric adsorption water treatment technology (EST) [J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(4): 218-219. (in Chinese).)
- [53] SHEN J, HUANG G, AN C, et al. Biophysiological and factorial analyses in the treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 226: 83-94.
- [54] DE OLIVEIRA M, FARIAS FRIHLING B E, VELASQUES J, et al. Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 705: 135568.
- [55] HOU L, KUMAR D, YOO C G, et al. Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 126715.
- [56] 窦培谦. 再生水中病原微生物在铜钼矿浮选过程中的迁移特征研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [57] LATRACH L, MASUNAGA T, OUZZANI N, et al. Removal of bacterial indicators and pathogens from domestic wastewater by the multi-soil-layering (MSL) system [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, 61 (2): 337-346.
- [58] ETURKI S, AYARI F, KALLALI H, et al. Treatment of rural wastewater by infiltration percolation process using sand-clay fortified by pebbles [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 49(1/2/3): 65-73.
- [59] ALISAWI H J A W S. Performance of wastewater treatment during variable temperature [J]. Applied Water Science, 2020, 10(4): 89.
- [60] 吴浩恩, 魏才健, 吴为中. 多级土壤渗滤系统处理低有机污染水的脱氮效果与机理解析 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (12): 4392-4399. (WU Haoen, WEI Caijie, WU Weizhong. Study on nitrogen removal performance and mechanism of external carbon source added two-stages multi-soil-layering systems for low pollutant loading wastewater treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(12): 4392-4399. (in Chinese))
- [61] LI Y H, LI H B, XU X Y, et al. Does carbon-nitrogen ratio affect nitrous oxide emission and spatial distribution in subsurface wastewater infiltration system? [J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 846-852.
- [62] FAN J, ZHANG B, ZHANG J, et al. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2013, 141: 117-122.
- [63] 严森. BAF-多级土壤渗滤系统组合工艺强化脱氮除磷试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [64] 潘晶. 地下渗滤系统微生物特征及强化脱氮工艺研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [65] 李丹, 王欣泽, 刘剑楠, 等. 多级土壤渗滤系统填料的脱氮除磷性能研究 [J]. 水处理技术, 2019, 45 (10): 24-29. (LI Dan, WANG Xinze, LIU Jiannan, et al. Study on nitrogen and phosphorus removal performance of substrates in multi-soil-layering systems [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(10): 24-29. (in Chinese))
- [66] SRINANDAN C S, D'SOUZA G, SRIVASTAVA N, et al. Carbon sources influence the nitrate removal activity, community structure and biofilm architecture [J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 292-299.
- [67] 徐显, 鲍安红, 张晓明. 生物炭对多介质土壤层系统 (MSL) 处理农村生活污水的效果 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (3): 262-265. (XU Xian, BAO Anhong, ZHANG Xiaoming. Effect of biochar on rural domestic sewage treatment by multi-media soil layer system (MSL) [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 262-265. (in Chinese))
- [68] KHALIFA J, OUZZANI N, HEJJAJ A, et al. Remediation and disinfection capabilities assessment of some local materials to be applied in multi-soil-layering (MSL) ecotechnology [J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 178: 53-64.
- [69] GUO J, ZHOU Y, YANG Y, et al. Effects of hydraulic loading rate on nutrients removal from anaerobically digested swine wastewater by multi soil layering treatment bioreactor [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 2688.

- [70] 叶海, 李森, 薛峰, 等. 表面负荷对多介质土壤层系统处理污染河水的影响 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 74-77. (YE Hai, LI Sen, XUE Feng, et al. Effect of surface load on treatment of polluted river water by MSL system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 74-77. (in Chinese))
- [71] 陈佳利. 多级土壤渗滤系统处理污染河水的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [72] GUAN Y, ZHANG Y, ZHONG C N, et al. Effect of operating factors on the contaminants removal of a soil filter: multi-soil-layering system [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2679-2686.
- [73] PERALTA A L, MATTHEWS J W, FLANAGAN D N, et al. Environmental factors at dissimilar spatial scales influence plant and microbial communities in restored wetlands [J]. Wetlands, 2012, 32(6): 1125-1134.
- [74] 郭俊元, 周禹伶, 江世林, 等. 多级土壤渗漏系统处理农村生活污水 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 182-192. (GUO Junyuan, ZHOU Yuling, JIANG Shilin, et al. Multi soil layering filter and its performance in rural domestic sewage treatment [J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 182-192. (in Chinese))
- [75] 宋颖. 水产养殖污染源强及多介质土壤层技术废水处理效果与机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [76] SBAHI S, OUAZZANI N, HEJJAJ A, et al. Neural network and cubist algorithms to predict fecal coliform content in treated wastewater by multi-soil-layering system for potential reuse [J]. Journal of Environmental Quality, 2021, 50(1): 144-157.
- [77] HO C C, WANG P H. Efficiency of a multi-soil-layering system on wastewater treatment using environment-friendly filter materials [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(3): 3362-3380. (收稿日期:2021-04-22 编辑:王芳)

(上接第 136 页)

- [12] 张珂, 牛杰帆, 李曦, 等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))
- [13] DIETTERICH T G. Ensemble learning [J]. The Handbook of Brain Theory and Neural networks, 2002, 2: 110-125.
- [14] BREIMAN L. Bagging predictors [J]. Machine Learning, 1996, 24(2): 123-140.
- [15] 赵铜铁钢, 杨大文, 蔡喜明, 等. 基于随机森林模型的长江上游枯水期径流预报研究 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 18-24. (ZHAO Tongtiegang, YANG Dawen, CAI Ximing, et al. Research on runoff forecast of the Upper Yangtze River in low water period based on random forest model [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2012, 31(3): 18-24. (in Chinese))
- [16] 周志华. 机器学习 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [17] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [18] 龚振淞, 何敏. 长江流域夏季降水与全球海温关系的分析 [J]. 气象, 2006, 32(1): 56-61. (GONG Zhensong, HE Min. Relationship between Summer Rainfall in Changjiang River Valley and SSTA of various seasons [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(1): 56-61. (in Chinese))
- [19] 宋文玲, 杨义文. 长江三峡地区夏季旱涝特征及气候预测 [J]. 气象, 2003, 29(7): 13-18. (SONG Wenling, YANG Yiwen. Characteristics of drought/flooding in the Yangtze Gorges and climate prediction [J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(7): 13-18. (in Chinese))
- [20] BOTHE Oliver, FRAEDRICH Klaus, ZHU Xiuhua, 等. 青藏高原夏季旱涝与大尺度环流的关系 [J]. 李耀辉, 翟颖佳, 译. 干旱气象, 2013, 31(4): 845-858. (BOTHE Oliver, FRAEDRICH Klaus, ZHU Xiuhua, et al. Relationship between summer drought and flood over the Tibetan Plateau and large scale circulation [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 845-858. (in Chinese))
- [21] 马振锋, 高文良. 青藏高原季风年际变化与长江上游气候变化的联系 [J]. 高原气象, 2003, 22(增刊1): 8-16. (MA Zhenfeng, GAO Wenliang. Relationship between interannual change over Qinghai-Xizang Plateau Monsoon and climate changing upper reach of Changjiang River [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(Sup1): 8-16. (in Chinese))
- [22] KOMER B, BERGSTRA J, ELIASMITH C. Hyperopt-sklearn: automatic hyperparameter configuration for scikit-learn [C]//ICML Workshop on AutoML. Austin TX: Citeseer, 2014: 50. (收稿日期:2021-01-19 编辑:王芳)