

人工湿地及强化措施在农村污水处理中的应用



殷发金^{1,2}, 熊烈钞^{1,2}, 马荣^{1,2,*}

¹西南林业大学机械与交通学院, 云南昆明 650224

²云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南昆明 650224

摘要: 本文从农村污水的现状出发, 分析了国内外目前常用的污水处理工艺以及现有的主流污水处理工艺, 将农村生活污水与城镇生活污水进行对比分析, 并针对农村生活污水的特点提出了适宜的处理措施-人工湿地, 由于单一的人工湿地处理措施会存在处理效率不高、出水水质不达标等问题, 所以本文针对人工湿地如何利用现有的强化工艺进行改进优化提出了自己的观点, 通过采用一些强化措施来提高人工湿地对农村污水的处理效率。文章对现有的各种强化工艺进行了介绍并分析, 比较每种强化工艺的优缺点, 尤其对磁场强化技术展开了详细的论述, 表明磁场强化技术在污水处理中有一定的作用, 并且与传统的未经磁场强化处理的工艺相比, 该项强化措施对污水的处理效果有显著的提高, 最后对人工湿地以及强化技术在农村污水处理中的应用提出了展望。

关键词: 农村污水; 人工湿地; 强化技术; 磁场强化

DOI: [10.57237/j.wjese.2023.01.006](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2023.01.006)

Application of Constructed Wetland in Rural Sewage Treatment and Its Strengthening Technology

Yin Fajin^{1,2}, Xiong Liechao^{1,2}, Ma Rong^{1,2,*}

¹School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

²Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract: This paper starts from the current situation of rural sewage, analyzes the current common sewage treatment process at home and abroad and the existing mainstream sewage treatment process, compares and analyzes rural domestic sewage with urban domestic sewage, and proposes suitable treatment measures for the characteristics of rural domestic sewage - constructed wetland, because a single constructed wetland treatment measure will have problems such as low treatment efficiency and substandard effluent quality, so This paper presents its views on how to improve and optimize the constructed wetland using the existing reinforcement process, and improve the efficiency of the constructed wetland for rural sewage treatment by using some reinforcement measures. The article introduces and analyzes various existing reinforcement processes, compares the advantages and disadvantages of each reinforcement process, and especially discusses magnetic field reinforcement technology in detail, showing that magnetic field reinforcement

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目青年项目 (202001AU070108); 云南省科技厅科技计划项目面上项目 (202201AT070048).

*通信作者: 马荣, mr@swfu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-09; 接受日期: 2023-02-13; 在线出版日期: 2023-02-16

<http://www.wjese.com>

technology has a certain role in sewage treatment, and compared with the traditional process without magnetic field reinforcement treatment, the reinforcement measures have significantly improved the treatment effect of sewage, and finally, the constructed wetland and reinforcement technology in rural. Finally, the application of constructed wetland and intensification technology in rural sewage treatment is proposed.

Keywords: Rural Sewage; Constructed Wetlands; Enhanced Technology; Magnetic Field Strengthening

1 引言

随着农村经济发展与人民生活水平提高,农村污水量逐年上升,但是对污水的处理率远远落后于城市地区[1]。据初步统计,2020年我国城市污水排放量为588亿t,县城污水排放量为105亿t,村镇部分污水排放量为233亿t,合计926亿t[2]。目前,大部分村庄污水收集处理系统不完善,生活污水未经处理就随意排放,大多数流经简易的沟渠或者自然沟渠直接排放到附近河道、水塘、农田,还有部分污水经自然蒸发或者土壤渗透,导致周边沟渠、河道和水系的水质发黑变臭,污染环境,影响人居环境和威胁居民身体健康[3]。农村生活污水已经成为农业面源污染的重要的来源之一。

农村环境污染问题事关菜篮子、水缸子和米袋子的重大民生保障,更深入影响美丽宜居乡村建设与乡村产业振兴绿色可持续发展目标实现。近年来,政府越来越重视农村水环境的治理,先后出台了乡村振兴战略、农村人居环境整治提升、美丽宜居乡村建设、农村环境污染治理等一批卓有成效的政策制度体系和行动计划指南,在《国民经济和社会发展规划“十四五”和二〇三五年远景目标》中明确指出“因地制宜推进农村改厕、生活垃圾处理和污水治理”,将农村生活环境的治理放在了重要位置,以污水治理提升为主攻方向,提出加强农村水环境治理和农村饮用水水源保护,实施农村生态清洁小流域建设,持续改善农村人居环境[4]。因此,农村污水处理作为云南省生态文明建设和美丽乡村环境整治保护的重点领域,必须给予充分的重视。

2 农村污水现状分析

农村生活污水处理率低[5],主要受限于其产生和排放的基本特性,具体体现在水量小[6]、波动大[7]、污染物构成简单[8]、污水来源多[9]、负荷分布不均[10]、收集设施不健全[11]。农村生活污水的特点决定了其治理不能复制城市污水的管理模式和处理工艺。从生活污水处理技术发展来看,处理工艺的选择不应仅满足

于出水水质的达标排放要求[12],还应结合农村生活污水产生和排放的特点,有针对性地选择收集模式和适宜处理工艺。从处理方式看,我国农村污水处理主要包括分散式处理、村镇集中处理和市政统一处理三种方式。受地理和经济因素的制约,集中式污水处理模式在居民居住较为分散的农村地区难以开展,而小型分散式污水处理设施能够实现生活污水的就近处理与利用,适用区域广,占用场地小,可以较好适应水质水量的变化,能有效地保护环境和公众健康,更适应农村地区。

我国从20世纪80年代开始推广分散式污水处理技术,人工湿地、稳定塘、生物滤池和A2O等工艺逐渐在农村地区得到推广使用。但是就以往的研究来看,关于处理技术的实验阶段和设施建成运行初期较多,而研究者对后续阶段设施的运行状况的关注较少;而招标和投标方可能具有较大的主观性和逐经济性,一味选择前沿先进和自动化水平高的工艺,很难因地制宜选择合适的工艺种类。传统生活污水收集和处理模式为入户管网统一收集和管网末端集中处理。农村生活污水处理设施大多来自直接小型化的城市生活污水处理工程,采用生物脱氮和化学除磷。国外,日本农村生活污水处理最常采用的是净化槽。但日本污水排放控制指标较少,仅有BOD5考核,无氮磷控制指标,容易实现达标排放。澳大利亚等人口密度小、土地资源丰富的国家,一般采用大面积土地处理的生态处理技术。在国内,从较低的处理率可以看出,农村生活污水治理仍处于起步阶段。在太湖流域农村生活污水PPP项目中应用较为典型的技术是MBR技术,考虑除磷达标,需要增加物化处理设备和药剂。农村聚落规模小、水量小,一体化生化处理设备需要集成度高,能耗高和运行维护投入大,性价比低,且产生除磷污泥等副产物。分散的设备处理产生的少量副产物,收集处置困难[13]。

3 常用污水处理方式

农村生活污水主要是农村居民在日常生活中产生的污水，成分较单一、稳定，污染物的变化幅度也较

小[14]。常用污水处理工艺复杂多样，生物、生态及物化等工艺均有广泛的研究和应用，常见的农村污水处理方式有[15]：

表 1 常用农村污水处理方式

Table 1 Commonly used rural sewage treatment methods

分类	处理系统	技术优势	应用问题
生物法	厌氧沉淀池	造价低廉，施工建议，运行无能耗	处理效果差，异味明显
	厌氧滤池	造价低廉，运行无能耗	处理效果差，异味明显
	生物转盘	无需曝气，动力消耗低，污泥量少	低温时处理效果差
	曝气生物滤池	处理效果好，不需设置二沉池和污泥回流系统	进水颗粒浓度要求高，反冲洗要求高
	移动床生物膜反应器	处理效果好，不需反应器，设施占地小	曝气量和搅拌强度控制要求高
	膜生物反应器	处理效果好，不需设置二沉池和污泥回流系统	膜污染和膜堵塞控制要求高，运维费用高
	序批式活性污泥反应器	处理效果好，不需设置二沉池和污泥回流系统	自动化控制要求高
生态法	人工湿地	造价低廉，运维简单，景观良好	低温条件处理效果下降，易冻结
	生态滤池	造价低廉，施工简易，运维简单	进水颗粒物浓度要求高，低温易冻结
	土地渗滤	造价低廉，对地表景观影响小	处理效果不稳定，可能影响地下水
物化法	物理过滤	造价低廉，运维简单	对可溶性污染物去除能力有限

相比城镇建设的高度集中化、布局合理化和相对规范化的先决条件，农村具有住户相对分散、房屋布局凌乱、村民普遍贫困、环境污染突出、收集处理设施不完整等显著特点，所以污水处理很难采用城镇的管网统一收集污水集中处理方式。目前，相对成熟工艺技术及其设备大多聚焦城镇生活污水处理，且存在工艺技术选择适宜精准性差、处理达标率不高、资源化利用效益低、运行管理及成本过大等问题，导致部分农村生活污水处理效益普遍不理想。

农村污水治理率低下成为当下必须解决的问题，如何提高农村污水的处理效率是其中的重要内容。常规的污水处理厂需要大量的建设和管理维护成本，这对农村地区并不适宜，所以需要提出一个成本低，无需专业人员管理，污水处理效率高，且适用于处理农村污水的可实施应用方案；此外农村地区面临更多的是生活污水，生产废水较少，其中氮磷含量较高，相对与城镇污水其污染程度较低，可生化性较好，生物处理法会更好，因此作为生态型的污水净化技术—人工湿地便被提出。

4 人工湿地的应用

近些年来，与污水处理相关的新技术层出不穷，人工湿地（Constructed Wetlands）作为一种典型的生态型污水净化技术，因其净化效果好、成本低、易于操作而受到世界各国的关注[16]。人工湿地是通过人工构建，

在自然或半自然净化系统的基础上开发的的水处理技术[17]，其中垂直流人工湿地因其占地面积小、水力负荷大而被认为是处理各种污水较好的选择。人工湿地作为一种生态型的水处理工艺，对污染物的去除能力主要是通过植物吸收、基质截留和微生物降解，即一系列物理化学和生物的共同作用完成，能有效削减水体中的污染物浓度[18-19]，具有能耗低、经济性好、效能稳定、无二次污染以及一定的景观价值等优点，近年来人工湿地被广泛用来处理城镇和农村生活污水、工业和农业废水、垃圾填埋场的废水以及暴雨径流等[20]。图 1 所示为湿地污染物的净化机制。但是在实际应用过程中往往会出现一系列问题，比如其占地面积通常较大，当季节变化尤其是冬天时，传统的单一的湿地系统对污染物的去除功效难以完全发挥，对水体中污染物的削减效率低且不稳定[21]，往往会导致其出水水质高于排放标准，此外其生命周期也较短，通常在 3~5 年后就难以有效发挥其净化的功能[22-24]。

因此，针对传统的单一人工湿地湿地基质易堵塞、低温条件下湿地系统净化效能较低、系统脱氮效率低等问题，通过采用现有的污水处理工艺与人工湿地结合，在经济高效的前提下提高湿地的处理效能，设计出基于强化人工湿地技术一体化的农村污水处理装置，适宜分散式的农村污水处理。目前，在污水处理领域通常采用的强化措施有高级氧化技术（AOPs）[25-27]（芬顿或类芬顿反应、臭氧氧化或催化臭氧氧化、光催化氧化技术、电化学氧化技术和电离辐射法）、电场强化

[28]、磁场强化[29]等。

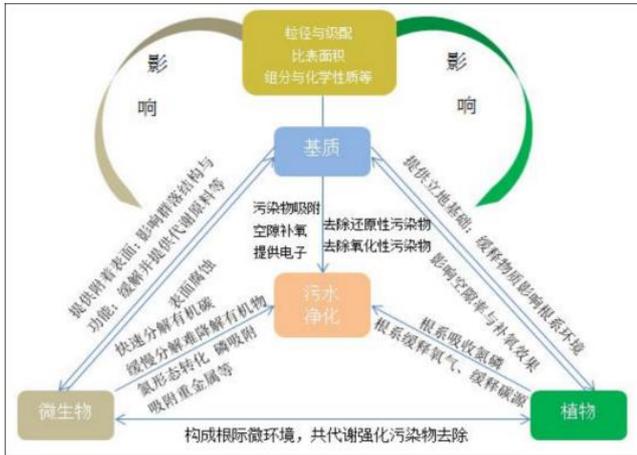


图1 湿地污染物进化机制

Figure 1 Evolution mechanism of wetland pollutants

5 强化型措施和技术

(1) 芬顿或类芬顿反应

亚铁盐和过氧化氢的混合物称为芬顿试剂，芬顿氧化法是一种广泛应用于去除有机污染物的方法[30]。对于芬顿氧化法，是将芬顿试剂（ Fe^{2+} 和 H_2O_2 ）加到污水中，可以反应生成 OH ，这些自由基能氧化或降解有机污染物。芬顿氧化法作为一种经典的 AOPs，具有很多优点：反应没有选择性、几乎能降解所有的有机物且降解效率高、反应条件温和、操作简单等。但是，pH、温度、 H_2O_2 浓度和 Fe^{2+} 浓度等多种因素均会影响处理效率。此外，芬顿氧化法具有几个重要的缺点，分别为使用条件局限于酸性条件、会产生大量的含铁污泥难以处理等。为了解决这些问题，人们用其他催化剂代替 Fe^{2+} ，即类芬顿氧化法[31]。

(2) 臭氧或催化臭氧氧化法

臭氧或催化臭氧氧化法是一种环境友好型的污水处理技术。具有 2.07V 氧化电位的臭氧可以氧化多种难处理的有机污染物。臭氧分子可以直接降解有机污染物。臭氧可以在催化剂的帮助下与水反应形成 OH ，该 OH 具有更强的氧化能力[32]。由于臭氧催化过程中会产生低分子量和可生物降解的中间产物，因此臭氧氧化处理可改善含有机污染物的污水的生物可降解性，提高污染物处理效率。近年来，已经被广泛用于水处理中，尤其是降解有毒有机物方面。但臭氧氧化不能够完全使有机污染物矿化，一般需要与其他工艺结合使用以达到更高的去除效率。单独使用臭氧工艺臭氧

利用率低、反应条件较严苛、最佳条件难以确定且运行成本较高等。而臭氧氧化与其他技术联用具有低能耗、高效率，在污水深度处理阶段具有较大的优势。

(3) 光催化氧化技术

光催化技术是通过催化剂作用，在一定的光照（太阳光、紫外光等）下，催化剂价带上的电子被激发进入导带，在价带上形成空穴，空穴将催化剂表面的 OH -和 H_2O 氧化为羟基自由基（ OH ）， OH 具有很强的氧化性，可进一步氧化降解污染物质[25]。近年来，针对纳米催化剂的催化、氧化效能研究成为主流，其在污水治理方面也具有广阔的应用前景[33]。光催化氧化法反应条件温和、运行成本低、效率高、无二次污染且易于与其他高级氧化技术联用等特点。但也存在催化剂的成本较高、光利用效率不高、可能产生毒性更大的中间产物和催化剂回收难度大等缺点。

(4) 电化学氧化技术

电化学氧化是将有机物在电流作用下被氧化并转化或分解为无毒无害物质的过程[26]。电化学氧化技术包括直接氧化和间接氧化，通常情况下，这两种方式同时存在。在直接氧化过程中，污水中的有机物可直接与阳极反应并失去电子，形成小分子化合物。对于间接氧化过程，污水中的阴离子与阳极反应生成氧化能力强的中间产物，这些中间产物进一步氧化分解有机物。这个过程与电解质有关[34]。不同的电解质会产生不同的强氧化产物，并产生不同的降解效率。 OH 是一种间接电化学氧化产生的中间氧化剂，被吸附到阳极表面。有机物也可能被 OH 氧化成小分子化合物和二氧化碳[35]。电化学氧化反应条件温和、操作简便、易行、很少或不会产生二次污染。但是能源消耗较大、稳定性不高、析氧析氢使得电流效率降低等。

(5) 电离辐射法

电离辐射（包括伽马射线和电子束）是一种通过间接或直接方式降解污水中有机污染物的新兴技术[27]。水在辐射过程中，可生成 OH 、 H 、 H_3O^+ 等多种活性自由基和 (e^-) 。 OH 可氧化有机污染物，而 (e^-) 可还原有机污染物。但电离辐射对污染物的降解效率受吸收剂量、初始 pH、有机物和水基质等多种因素限制[36]。电离辐射技术工艺简单、效率较高、经济且不会造成二次污染，但对于此技术的研究很少，未使其作用得到充分发挥。

(6) 电场强化

外加电场可以提高对微量有机物的去除效果。一方面，电场力作用可以使得水中的带电荷有机物发生

定向迁移,减少或增加膜表面的微量有机物附着[37];另一方面,尤其是在沿海地区,因水中含有的较高浓度的氯离子,可在电极表面氧化生成活性氯组分,因而可氧化去除微量有机物[38]。电解法水处理技术利用电化学反应和污染物在溶液中的迁移、转化实现废水的净化。电解槽兼有氧化、还原、絮凝、沉淀等多种功能具有占地少、设备体积小、易自动控制等优点,在水处理中有较好的发展前景但存在成本高、能耗大、副反应多等不足。

(7) 磁场强化

磁场可以通过影响水的物理化学性质来促进污水的净化,包括絮凝、表面张力和渗透压[39]。在适宜的强度下,磁场能够影响微生物的生长代谢,增强微生物的活性,并能提高酶活性[40],从而有利于污染物的生物去除。有相关学者[41]研究了 30 mT 的磁场在低温条件下对活性污泥活性的影响,发现静磁场通过改变微生物膜,使得部分微生物对低温环境产生更强的抗性,进而提高微生物在低温下污水生物处理工艺中的活性。与其他方法相比,由永久磁铁所提供的磁场在污水处理过程中有以下优势:不会造成二次污染,无需额外能源,节省成本以及易于管理和操作等。

相比高级氧化法和电场强化技术,磁场强化技术不需要额外的能耗,能够显著提高湿地的净化功效,不会产生二次污染,并且不会对湿地植物造成负面影响[42]。其作用机理主要包括两方面,一方面是磁场增强污水的理化性质,促进物质交换和生物体吸收。另一方面是微生物对磁场的响应特征,磁场对微生物活性及酶活性的促进作用,有利于污染物的生物去除。

李志豪[43]等人通过采用普通陶粒外加静态磁场(50 mT)和磁性陶粒(2.5mT和5mT)曝气生物滤池处理高浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 废水,证明了磁场强化(外加静态磁场、磁性陶粒)下的曝气生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率显著高于普通陶粒的生物滤池,磁场强度为 2.5 mT 的磁性陶粒上生物膜的硝化反硝化性能显著增强,硝化基因丰度及硝化菌属丰度更高。适当强度的磁场可以提高系统中微生物的生长代谢, Ji [44]等人通过施加 0-500mT 的磁场, HRT 为 0-60h 的条件下,研究磁场对活性污泥活性的影响,结果表明最佳的生物降解条件为磁场强度为 20mT, HRT 为 48h,在此条件下显著提高了活性污泥的活性,大大刺激了有机污染物的生物降解过程,从而提高了对污水的处理效率。Xu [45]等人研究发现 6-10mT 的弱磁场能促进蜡状芽孢杆菌保外聚合物的形成,从而增强微生物对污染物的吸

附能力。因此,相比传统的人工湿地,施加外部磁场强化(弱磁场)的人工湿地可以促进水体中微生物对污染物的吸收,从而实现对水体的净化效果。

综上所述,要实现农村污水的一体化生态处理,解析并揭示氮磷有机物污染物的去除机理,就必须要在一下几个方面实现突破:(1)一体化生物生态系统的构建:拟采用磁场强化人工湿地的方法,系统得出不同设计方案及农村污水水质差异对污染物的去除差异,实现农村氮磷有机物污染针对性去除解析;(2)农村氮磷污染去除的关键过程及其机理研究:拟采用户外模拟试验方法,深入揭示农村污水水质条件及微环境条件(pH、DO、电导率、氧化还原电位等)对污染物迁移关键过程并识别主要驱动因子,分析比较吸附前后吸附剂的表现特征、官能团和表面化学特征,得出污染物去除的机理。不仅为系统揭示农村氮磷有机物污染提供理论基础,也为推进农村污水生物+生态化净化提供科学依据,更为农村污水处理工艺技术选择等提供技术支撑。

6 对于人工湿地的展望

农村生活污水处理率低,主要受限于其产生和排放的基本特性,具体体现在水量小、波动大、污染物构成简单、污水来源多、排放面广、负荷分布不均、收集设施不健全。处理工艺的选择不应仅满足于出水水质的达标排放要求,还应结合农村生活污水产生和排放的特点以及农村地区的实际经济状况,有针对性地选择收集模式和适宜处理工艺。从处理方式看,我国农村污水处理主要包括分散式处理、村镇集中处理和市政统一处理三种方式。受地理和经济因素的制约,集中式污水处理模式在居民居住较为分散的农村地区难以开展,而小型分散式污水处理设施能够实现生活污水的就近处理与利用,适用区域广,占用场地小,可以较好适应水质水量的变化,能有效地保护环境和公众健康,更适应农村地区。

近些年来,随着水污染情况的日益加剧,国内外学者在开发新型污水净化工艺的同时,还采取将现有的污水处理技术结合其他材料以提高污水处理效能。磁性材料是一类发展迅速,已经在众多领域得到了广泛重视的材料,且具有无二次污染、无需额外能源、结构简便等优势,使许多研究者采用磁场强化污水生物处理技术。

人工湿地工艺是通过物理、化学和生物的协同作

用, 是一种模拟自然湿地的人工生态系统, 能够高效处理污水, 在我国已得到广泛应用, 并且广泛适用于我国农村地区。无论是和其他工艺配合的组合工艺, 还是单一工艺, 包含人工湿地的工艺被确定为最佳可行工艺的次数最多, 说明人工湿地处理工艺虽然占地面积较大, 但是在农村生活污水处理中优越性最强, 体现了人工湿地工艺运行可靠的优点。同时, 生物+生态组合技术也凸显优势, 表明生物+生态组合法将是我国未来农村污水处理的发展趋势和主导力量。

参考文献

- [1] 范理, 李坤, 王亚娟, 孙国健. 农村生活污水收集与处理模式的探讨 [J]. 环境工程, 2014, 32 (S1): 169-171+209.
- [2] 王昶, 王力, 曾明, 郝林林, 孙娟娟. 我国农村生活污水治理的现状分析和对策探究 [J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39 (02): 283-292.
- [3] 侯娟, 赵祥华, 吴学灿, 赖丹. 云南省农村生活污水治理现状与形势分析 [J]. 环境科学导刊, 2020, 39 (06): 72-77.
- [4] 周浩, 卢楠, 邹家乐, 刘梦梦, 朱兆亮. 农村生活污水收集模式及污水处理现状分析 [J]. 净水技术, 2021, 40 (08): 90-96.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016 年中国城市农村建设统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [6] 司圣飞, 陈永青, 刘康怀. 人工快渗处理城镇污水的优化技术研究 [J]. 给水排水, 2011, 47 (S1): 235-238.
- [7] 刘晓璐, 牛宏斌, 闫海, 等. 农村生活污水生态处理工艺研究与应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (09): 184-191.
- [8] Xu D, Xu J M, Wu J J, et al. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wet-land systems [J]. Chemosphere, 2006, 63 (2): 344-352.
- [9] 吕锡武. 可持续发展的农村生活污水生物生态组合治理技术 [J]. 给水排水, 2018, 54 (12): 1-5.
- [10] Morris M, Herbert R. The design and performance of a vertical flow reed bed for the treatment of high ammonia, low suspended solids organic effluents [J]. Water Science and Technology, 1997, 35 (5): 197-204.
- [11] 许红超, 戚高林, 苑保鹏. 农村水环境治理方法浅析 [J]. 河南水利与南水北调, 2010 (03): 18-19.
- [12] 程方奎, 巩子傲, 汪思宇, 等. 农村生活污水低耗资源化处理工艺应用 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50 (06): 1076-1083.
- [13] 崔晨. 陕南地区农村生活污水治理技术集成研究 [D]. 西
- [14] 周卿伟. 人工湿地强化技术及其效能研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [15] 曹安琪. 农村生活污水处理技术研究进展 [J]. 新农业, 2021 (01): 95-96.
- [16] 赵祥华, 侯娟. 云南环保技术与工程案例示范 [M]. 云南: 云南科技出版社, 2015.
- [17] Fetter Jr, C., et al. (1976). "Potential Replacement of Septic Tank Drain Fields by Artificial Marsh Wastewater Treatment Systems a." Groundwater 14 (6): 396-402.
- [18] Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience [J]. Science of the total environment, 2009, 407 (13): 3911-3922.
- [19] Shuiping C, Zhenbin W, Qijun K. Macrophytes in artificial wetland [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14 (2): 179-184. [成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究 [J]. 湖泊科学, 2002 (02): 179-184.
- [20] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望 [J]. 湖泊科学, 2019, 31 (06): 1489-1498.
- [21] Vymazal J. Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years? [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122-117.
- [22] 王淼, 田军仓. 农村绿色建筑分散型生活污水处理研究综述 [J]. 中国农村水利水电, 2014 (09): 64-67.
- [23] 翟俊, 翟豪冲, 马宏璞, 刘文博, 成水平. 多级人工湿地对生活污水中磷素的去除规律 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (21): 75-79.
- [24] 林卉, 姜忠群, 冒建华. 人工湿地在农村生活污水处理中的应用及研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2020, 22 (05): 129-136.
- [25] 杨鹤云, 郑兴. 高级氧化法降解有机污染物的应用及研究进展 [J]. 水处理技术, 2021, 47 (12): 13-18. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2021.12.003.
- [26] Martínez-Huitle C A, Brillas E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 87 (3-4): 105-145.
- [27] 许韡, 王丹侠, 沈俊毅, 潘卫兵. 电离辐射技术在水处理中的应用 [J]. 职业与健康, 2018, 34 (23): 3306-3309. DOI: 10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0923.
- [28] 周厚英. 电场强化生物反应器处理分散式生活污水的试验研究 [D]. 兰州理工大学, 2020. DOI: 10.27206/d.cnki.gsgsu.2020.001189.

- [29] Li Mengqi, Zhang Jian, Liang Shuang, Li Ming, Wu Haiming. Novel magnetic coupling constructed wetland for nitrogen removal: Enhancing performance and responses of plants and microbial communities. [J]. *The Science of the total environment*, 2021, 819.
- [30] 王国庆, 党炜, 李田田, 禹栋楠. 芬顿氧化法在废水处理中的应用及其发展 [J]. *濮阳职业技术学院学报*, 2020, 33 (01): 22-23+46.
- [31] Wang S, Wang J. Trimethoprim degradation by Fenton and Fe (II)-activated persulfate processes [J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 97-105.
- [32] Wang J, Sun W, Xu C, et al. Ozone degradation of chloramphenicol: efficacy, products and toxicity [J]. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2012, 15 (2): 180-192.
- [33] 常颖, 王宝贞, 王琳, 等. 光催化氧化反应器的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2004 (4): 34-37.
- [34] 任显明. 电化学水处理技术的研究现状及发展探讨 [J]. *化工管理*, 2019 (23): 220.
- [35] 冯雪梅, 卫新来, 陈俊, 吴克, 李明发. 高级氧化技术在废水处理中的应用进展 [J]. *应用化工*, 2020, 49 (04): 993-996+1001. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20200310.001.
- [36] Wang J, Chu L. Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: an overview [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, 125: 56-64.
- [37] Li C, Zhang M, Song C, et al. Enhanced treatment ability of membrane technology by integrating an electric field for dye wastewater treatment: A review [J]. *Journal of AOAC International*, 2018, 101 (5): 1341-1352.
- [38] Ganiyu S O, Van Hullebusch E D, Cretin M, et al. Coupling of membrane filtration and advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residues: a critical review [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 156: 891-914.
- [39] Lebkowska M, Rutkowska-Narożniak A, Pajor E, et al. Impact of a static magnetic field on biodegradation of wastewater compounds and bacteria recombination [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (23): 22571-22583.
- [40] Filipič J, Kraigher B, Tepuš B, et al. Effect of low-density static magnetic field on the oxidation of ammonium by *Nitrosomonas europaea* and by activated sludge in municipal wastewater [J]. *Food technology and biotechnology*, 2015, 53 (2): 201.
- [41] Niu C, Liang W, Ren H, et al. Enhancement of activated sludge activity by 10–50 mT static magnetic field intensity at low temperature [J]. *Bioresource technology*, 2014, 159: 48-54.
- [42] Wu S, Kusch P, Brix H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review [J]. *Water research*, 2014, 57: 40-55.
- [43] 李志豪, 朱远墨, 丰传雯, 嵇鸿民, 任洪强, 耿金菊, 许柯. 磁场强化曝气生物滤池处理高浓度氨氮废水的研究 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41 (02): 440-450.
- [44] Ji Y, Wang Y, Sun J, et al. Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field [J]. *Bioresource technology*, 2010, 101 (22): 8535-8540.
- [45] Xu Y, Hou M, Ruan J, et al. Effect of magnetic field on surface properties of *Bacillus cereus* CrA and its extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28 (21): 2196-2208.

作者简介

殷发金

1998 年生, 硕士研究生, 研究方向为: 水处理装置研究.

E-mail: 2233435953@qq.com