DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.01.006

等离子体处理农村污水技术研究现状与趋势

王冉冉[1, 2], 张帆[1], 齐凯[3], 王光荣[4], 张文娟[5], 申小冉[5],
樊梅娜[5], 刘双喜[1, 2*]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院,山东泰安,271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室,山东泰安,271018; 3. 山东五洲电气股份有限公司,山东潍坊,261000; 4. 中材(南京)矿山研究院有限公司,江苏南京,211100; 5. 山东碧蓝生物科技有限公司,山东泰安,271400)

摘要:近年来,发展中国家农村生活水平的提高和农村工业经济的不断升级,使得农村污水排放也愈加严重。这些来自生产生活污水、农田尾水以及养殖废水的农村污水会严重破坏生态环境,影响居民的幸福指数和经济的发展。本文指出了传统生态法和生物处理法存在的处理周期长、受环境影响大、存在二次污染等局限性,进一步探讨了等离子体技术在处理农村污水时应用范围广、处理效率高、无二次污染的优势,填补了等离子体技术在处理农业污水的空白。虽然等离子体的某些反应机理还不明确,对装置要求比较高,这些仍需不断改善,但未来还可以通过与其他技术的结合,进一步提高等离子体技术的效率和适用范围,使其在污水处理领域发挥更大的作用,优化和改进发展中国家农村污水综合处理过程。

关键词:等离子体;农村污水;生态法;生物处理法
中图分类号:X703 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2024)01-0051-07

王冉冉, 张帆, 齐凯, 王光荣, 张文娟, 申小冉, 樊梅娜, 刘双喜. 等离子体处理农村污水技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 51-57
WANG Ranran, ZHANG Fan, QI Kai, WANG Guangrong, ZHANG Wenjuan, SHEN Xiaoran, FAN Meina, LIU Shuangxi. Development status and trends of plasma treatment of rural sewage [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 51-57

0 引言

农村污水处理是推动改善农村人居环境的重要环节。2022年我国生态环境部发布了农业农村污染治理攻坚战五年行动计划[1]。规划指出,完善农村人居环境,建设美丽宜居村是实施乡村振兴战略的重要任务。因此,农村污水处理对于推动农业农村绿色低碳发展、加强农村生态文明建设具有重要意义。2022年我国农村污水排放量达到了3.371×10^{10} m^3。如今,我国农村污水排放量仍在增加,但乡镇缺乏完善的污水收集系统和污水处理设备。我国农村居民住所分散大多数农村地区无法建设污水管网和污水集中排放系统,农村污水难以有效处理[2]。

目前农村污水处理方式主要分为生态处理技术和生物处理技术,生态处理技术分为人工湿地技术、稳定塘技术、土地处理技术[3],CHEN等和朱益萍研究发现传统生态法和生物处理法存在占地面积大、污染负荷低、处理时间长、处理效果不稳定等缺点[4-5]。因此,需要发展新的污水处理工艺。等离子体水处理技术是一种先进的高级氧化技术[6],与目前的污水处理技术相比,该技术优点是无须添加化学药品,且不产生需后续处理的污泥,处理完的水可符合最严苛的排放标准,也可更进一步实现水资源再生利用,反应效率高,反应所需时间短,应用范围广。该技术在污水处理中具有良好的应用前景[7]。

本文简单概括了农村污水的来源和危害,对农村常用的传统污水处理技术进行了总结,并对其存在的局限性进行了分析,探讨了等离子体技术在处理农村污水时的优势,填补了等离子体技术在处理农业污水的空白,综述了等离子体技术在处理农村污水的研究进展,对等离子体净水存在的问题和发展趋势进行了总结并提出了建议。

收稿日期:2023-03-27 修回日期:2023-07-20
基金项目:山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)(2022TZXD0041)
第一作者:王冉冉,男,1979年生,山东淄博人,博士,副教授;研究方向为农业机械化。E-mail: wranran@163.com
*通信作者:刘双喜,男,1978年生,陕西渭南人,博士,副教授;研究方向为智能农业装备和图像处理。E-mail: shuangxiliu168@163.com

1 农村污水的来源和危害

由于农村居住分散,农业污水的污染面广且分散。污水来源多,排放量大。污水处理技术相对落后,除毗邻城市的农村地区生活污水可以直接排入城市污水处理厂外,大多数农村地区无法建设污水管网和污水集中排放系统[8]。农村污水难以有效处理,管理水平低[9],村民环保意识薄弱,随意向土地倾倒生活污水严重,污染农村地表水和地下水,严重影响农村居民的健康幸福指数。

根据农村的生产活动,我国农业废水的来源主要分为以下四个方面。

1.1 农业生产污水

这部分污水主要来自农村工业活动,比如化肥生产、食品加工、饮料生产等行业产生的污水,突出特点是氨氮含量高,污染物主要包括有机物、悬浮固体、磷和硫酸盐等有害化学物质。

1.2 农村生活污水

生活污水是人们在日常生活中向外界环境所排放的各类废水,农村生活污水与农村居民的生产生活方式密切相关。并随着休闲农业的发展,农家乐也产生了大量清洗废水,污水中化学需氧量(COD)和氮磷含量高,用水高峰期间排放量大,消耗较为集中,排水规模和排出水质随着旅游旺季淡季有较大的高低起伏,餐饮类的含油量高。

1.3 农田尾水

农田地表径流水,里面包含农业生产中的化肥和不合理使用的农药,没有有效的手段处理,直接排放后污染物进入河流、湖泊、内海等水域,水中含有大量的无机盐、氮、等养分,对地表水造成严重污染,还会对水体造成富营养化[10]。

1.4 畜禽养殖废水

畜禽业是我国农村经济重要组成部分,这部分污水主要来自家禽养殖、奶牛养殖、养猪等畜牧业活动,畜禽的粪便和尿液排放使养殖废水中的化学需氧量(COD)、氮、磷和病原体含量很高,这类污水通常有强烈气味和高浊度的特点。

综上所述,农村污水含大量氮、磷等无机盐离子、固体悬浮物及致病菌等污染成分,水中COD排放量高。随着这类污水的不达标处理,排放到江河湖海之中,水中氮元素含量升高,水体富营养化,会促进蓝藻、绿藻、硅藻等微生物大量繁殖,消耗水中游离氧,并且还会转化为亚硝酸盐和硝酸盐,对人体及其他生物有毒害作用[11-12]。受污染的水对健康造成问题,并导致水传播疾病,不仅如此水污染对经济和生态环境也会造成严重危害。因此,对农村污水的有效处理是一项具有挑战性的任务。

2 农村污水常用处理技术

农村传统污水处理方法有人工湿地技术、稳定塘技术、土壤渗滤技术、生物处理技术,技术特点见表1。

表1 传统农村污水处理方法

Table 1 Traditional rural sewage treatment methods

常见的污水处理技术	优点	缺点
人工湿地技术	(1)操作维护方便;(2)管理简单;(3)投资和运营成本低。	(1)占地面积大;(2)受温度影响,冬季作业困难;(3)易造成二次污染[13-15]。
稳定塘技术	(1)投资和运行成本低;(2)维护简单;(3)操作方便。	(1)液压停留时间长;(2)处理效率低;(3)占地面积大[16-17]。
土壤渗滤技术	(1)运行成本低;(2)出水效果好;(3)抗冲击负荷能力强	去除能力受土壤吸附能力限制[18]。
生物处理技术	(1)处理量大;(2)处理效果好;(3)无二次污染[19]。	(1)占地面积大;(2)处理周期长;(3)受环境影响大。

人工湿地技术利用土壤和填料组成填料床,使污水在床体的填料缝隙中流动或在床体表面流动,人工湿地去除的污染物范围广泛,包括氮、磷、固体悬浮物、有机物、微量元素等,它的操作和管理都十分简单,投入成本较低,适合人口密度低、污染排放少、资金投入少、技术人才匮乏的地区,但其冬季运行困难,处理过程中会造成二次污染[20]。

稳定塘技术利用基质和植物组成的人工生态系统对污水进行处理,能充分利用地形,减少建设费用,既实现了水资源的再生利用,又获得了经济效益。适用于废弃河流、水库、池塘荒芜的地区和排放少量生活污水的小村庄。但是,它需要大规模的占地面积才能实现高度的处理。此外,其处理效率取决于气候区域条件和污水特性,往往效率较低[21]。

土壤渗滤技术利用土壤间隙、土壤微生物、植物根系和土壤表面下的物理、化学反应进行处理,污水向下渗流的过程中,再经过生物的协同作用去除了生活污水中的有机氮、磷等污染物[22]。该技术规模小,适用于闲置土地和适宜温度的地区。该技术利用原土的自然

净化能力处理污水，系统资金投入低、工程造价较低、运营成本低，管理方便；它可以利用污水中的水肥资源，将污水处理与绿化相结合，美化、改善区域生态环境。但是其处理能力受土壤吸附能力限制，运行过程中容易发生基质堵塞现象，系统处理负荷较低，对氮元素的去除效果不佳，如果管理不到位可能会造成地下水污染和原土地的污染。

生物处理技术是利用微生物的代谢作用处理污染物，包括活性污泥法、生物膜法、厌氧生物处理法等。该技术运行稳定，对污染负荷的抵抗力强，适用于大规模的污水处理，但该技术的占地面积大，处理周期长，因此对农村地区的适用性较差[23]。

综上可见，传统处理方法主要依靠系统中填料的吸附过滤、微生物降解或植物的富集吸收，对氮、磷、COD有较高的去除率。一般而言，这些方法都会面临占地面积大、冬季运行困难、基质堵塞、处理效率低等问题。相比之下，等离子体处理技术对污染物的去除能力强，出水水质稳定，处理效果优良，对污染之后的水域也有很好的净化效果。既可以应用于分散式农村，也可以应用于集中式农村地区，将成为农村污水处理的主流发展方向。

3　等离子体处理农村污水

3.1　等离子体处理污水技术原理

低温等离子体是在外加电场作用下，通过不同放电方式产生的高能电子、自由基、离子等组成的混合体[24]。处理装置如图1所示。

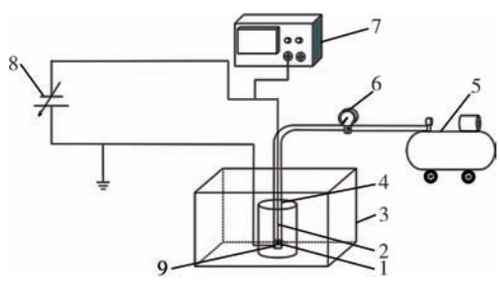


图1　等离子体污水处理装置示意图

Figure 1　Schematic diagram of plasma sewage treatment device

1. 气孔　2. 内电极　3. 等离子体发生装置　4. 气管
5. 气泵　6. 调压阀　7. 示波器　8. 高压电源　9. 外电极

等离子体污水处理系统需要高压脉冲电源连接等离子体发生装置，等离子体发生装置根据放电方式的不同分为电晕放电、辉光放电、介质阻挡放电等形式，根据放电形式将反应电极放入污水中，根据处理污染物的类型用气泵向污水中通入气体介质，高能电子与气体或液体在放电空间中发生非弹性碰撞，产生了强氧化性活性物质，如臭氧(O_3)、过氧化氢(H_2O_2)、羟基自由基(·OH)等，认为其原理如式(1)～式(8)[25-26]。

$$O_2+e^-\rightarrow O+O(^1D) \quad (1)$$

$$O(^1D)+H_2O\rightarrow 2\cdot OH \quad (2)$$

$$H_2O+e^-\rightarrow \cdot OH+\cdot H \quad (3)$$

$$e^-+O_2\rightarrow \cdot O_2^- \quad (4)$$

$$O(^1D)+O_2\rightarrow O_3 \quad (5)$$

$$\cdot H+O_2\rightarrow HO_2\cdot \quad (6)$$

$$HO_2\cdot+H_2O\rightarrow H_2O_2+\cdot OH \quad (7)$$

$$H_2O_2+e^-\rightarrow \cdot OH+OH^- \quad (8)$$

高能电子对水分子轰击并和氧分子作用生成·OH，·OH有很高的电负性，十分容易将污染物分子氧化，对于常规方法难以处理的大分子有机物，它都能使其分解。放电过程中还会产生O_3，O_3除了能转化为·OH处理污染物外，还可以和含不饱和键的有机物进行加成反应，使其氧化分解[27]。等离子体处理污水的反应过程如图2所示。

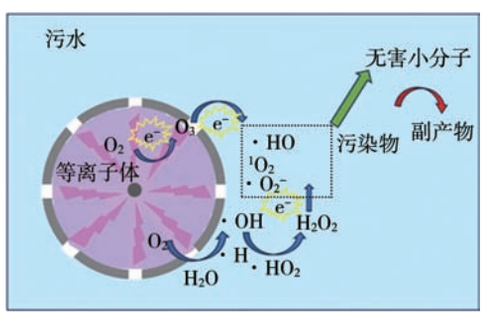


图2　等离子体反应示意图

Figure 2　Schematic diagram of plasma reaction

除高能电子碰撞产生的活性物质外，放电还产生紫外线辐射、高温热解、激波等效应，协助降解污染物[28]，这些效应本身并没有明显的污水处理作用，但与等离子体反应结合起来，会使等离子体的处理效果明显提升，最终将有害的大分子污染物转化为无害的小分子物质，从而达到污水治理的目的[29]。

3.2　等离子体处理农村污水的研究现状

农村污水主要来自农田径流以及生产污水的排放，污水中氮和磷的含量很高，污染范围大，水质大多呈弱碱性且有农药残留，污水浑浊度高，排放的污水会造成富营养化，水中藻类、寄生虫等微生物易大量繁殖。

丛来欣等[30]用介质阻挡放电(DBD)处理含马拉硫磷和毒死蜱的农药污水，研究表明，在放电时间为80 kV，处理时间180 s的条件下，二者的降解率分别为64.60%和62.69%，通过对活性物质的观察，增大放电电压、延长处理时间、降低溶液初始浓度更有利于活性物质对污染物的处理，大分子有毒物质最终被反应为磷酸盐和硫酸盐等小分子物质。LI等[31]利用DBD

放电等离子体处理常规技术无法处理的啶虫脒废水,研究表明,随着功率的增加,等离子体结合高能电子辐射、臭氧氧化、紫外光解等作用对啶虫脒去除效率大大增强。在放电功率 170 W,处理时间 200 min 的条件下,初始浓度为 50 mg/L 的啶虫脒污水降解率达到 83.5%。但继续输入能量会造成反应器温度升高,不利于活性物质的产生。WU 等[32]首次用 DBD 等离子体处理氨氮废水,处理过程中加入沸石,研究表明,氨氮去除率随放电电压、放电频率、沸石投加量和初始 pH 的增加而增加,随初始氨氮浓度的增加而降低,对氨氮的最佳去除率为 75.11%。在此基础上,SUNJAE 等[33]首次用液相放电等离子体(LPPT)的方式处理氨氮废水,研究发现,较高的脉冲重复次数、较长的脉冲持续时间以及碱性条件有利于氨氮的去除,碱性环境下活性物质的氧化性更强,脉冲频率和脉冲持续时间的增加,增大了输入的能量和分子的碰撞次数,更有利于等离子体的产生和对污染物的降解。在处理 25 min 后,50 mL 浓度为 1 000 mg/L 氨氮废水完全降解,氨氮去除的机理为加速电子的碰撞和·OH 的氧化反应,并证实了 LPPT 法对废水中氨氮的去除是可行的。

等离子体不仅能除去废水中的污染物,而且对藻类等微生物也有很好的灭杀作用。等离子体中的活性物质能破坏藻类细胞结构,使其失活。李芳等[34]利用大气压等离子体快速杀死水中的水华针杆藻,研究表明,·OH 快速致死的方法可高效处理高藻水。依成武等[35]采用强电场电离放电的方法,用等离子体处理水中的铜绿微囊藻,输入功率和曝气量的增大能促进氧化性等离子体的产生,进而提高反应速率和转化率,碱性环境中氧化物质的氧化速度更快,氧化性能更好,最优条件下灭杀效果达到 100%。蒲思川等[36]用双通道等离子体放电的方式处理螺旋鱼腥藻,研究发现,等离子体的灭活率随电极—液面间距和液层厚度的增大而降低,随放电时间的延长而升高,溶液液相体系因素对灭活效果无显著影响,实验中对鱼腥藻的灭活效果在 90% 以上,且效果不反弹,研究证明了等离子体破坏了藻细胞的细胞结构,细胞膜通透性增大,细胞内容泄露导致死亡。WANG 等[37]用 DBD 处理污水中的寄生虫,等离子体对日本血吸虫尾蚴有良好的灭杀作用,研究发现,通入气体中氧气含量的增加更有利于提升灭杀效果,等离子体中的氧化性物质对寄生虫的灭杀起主要作用。该系统更适合于放大和集成现有的水处理工艺,能有效防止吸血虫病的传播。

等离子体不仅直接作用于藻类等微生物本身,破坏其细胞结构,对其进行高效的灭杀,还可以间接影响微生物的生存环境,抑制藻类等微生物的生存。

可以发现,等离子体在处理农村废水中的污染物时,比传统处理法高效很多。等离子体的氧化能力强,能源清洁,并且不需要任何外部化学品。等离子体的产生方式也是多种多样,通过使用多种等离子体装置(例如大气压等离子体、介质阻挡放电等离子体和辉光放电等离子体)产生的等离子体均能达到优异的污水处理效果[38]。

3.3 等离子体处理污水中存在的问题

等离子体污水处理技术在应用中存在一定不足,目前产生等离子体的方式很多,如何将反应器的结构设计成最合适的样子是首先需要考虑的问题。实验中虽然证明了等离子体对污染物的去除效果很强,但是其反应机制仍不明确。大多数的污染物去除都得益于等离子体的强氧化性物质,但是这类物质对电极也有一定的腐蚀性,尤其是反应大多在酸碱环境下进行,影响电极寿命。等离子体对于某些污水的处理效果也十分有限,如何将它与其他处理工艺结合起来,提升反应效率,弥补其他工艺的不足也是一个重要研究方向。

4 总结与展望

污水处理技术是深入研究的主题,在能源消耗,水质,环境和技术兼容性以及技术经济研究等各个方面不断改进。传统污水处理方法的研究已经达到了瓶颈,而新兴的等离子体水处理技术有着优秀的发展前景,尤其是等离子体中的·OH 几乎无选择地与污水中任何污染物反应,处理类型广泛,还伴随着放电过程中的高能电子碰撞、臭氧氧化、紫外光解等作用协同处理污染物,降解效率高,操作简便,处理过程没有二次污染,而且在常温常压下就可以进行。该污水处理方式适用于农村散户小型污水处理。但该技术在实际应用中还是有一定的局限性,针对该技术的不足,应加强 4 个方面的研究。

1)目前产生等离子体的方式很多,不同的废水处理方式净水效果也不相同,未来将更多地研究低温等离子体各种放电方式及相关参数,寻求最佳组合,优化工艺,以获得尽可能的大空间利用率和好的处理效果;

2)目前的很多反应机理还不能被解释,等离子体在净水过程中受酸碱度、污染物浓度、气体介质、脉冲频率、电压大小、反应时间等诸多因素影响,等离子体水处理过程中发生的反应又十分复杂,只有明确其反应机理,才能找到最佳反应条件,并有利于这类技术的推广。

3)目前很多等离子体降解反应稳定性较差,电极可能会被腐蚀,设计结构合理的与电源匹配的反应器,寻找性能更好的电极材料,增强等离子体放电的稳定

性，使净水效果持续高效。

4）目前已经有了很多等离子体协同其他技术的应用，可以继续考虑将该方法与其他污水处理方式结合，增大处理量，设计合理的工艺流程，以便发挥其在深度处理以及提高废水可生化性方面的优势，并提高其经济性。

参 考 文 献

[1] 生态环境部．关于印发《农业农村污染治理攻坚战行动方案（2021—2025年）》[EB/OL]．https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202201/t20220129_968575.html，2023－12－15.

[2] 夏超波．组合人工湿地技术在农村生活污水治理中的应用[J]．化工设计通讯，2023，49(3)：170－172.
XIA Chaobo. Application of combined constructed wetland technology in rural domestic sewage treatment [J]. Chemical Engineering Design Communications，2023，49(3)：170－172.

[3] 刘伟才，丁锋．我国农业污水处理技术的现状与处理方式[J]．湖南生态科学学报，2015，2(4)：40－45.
LIU Weicai，DING Feng. On the current situation and countermeasures of agricultural wastewater treatment technology in China [J]. Journal of Hunan Ecological Science，2015，2(4)：40－45.

[4] CHEN P，ZHAO W，CHEN D，et al. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage：A review [J]. Water，2022，14(15)：2439.

[5] 朱益萍．农村生活污水处理现状分析及对策探讨[J]．水资源开发与管理，2023，9(9)：28－32，11.
ZHU Yiping. Analysis of current status of rural domestic wastewater treatment and discussion of countermeasures [J]. Water Resources Development and Management，2023，9(9)：28－32，11.

[6] 马可可，周律，辛怡颖，等．低温等离子体技术用于废水处理的研究进展[J]．应用化工，2019，48(1)：145－150.
MA Keke，ZHOU Lü，XIN Yiying，et al. Research progress in application of low temperature plasma technology for wastewater treatment [J]. Applied Chemical Industry，2019，48(1)：145－150.

[7] 刘亚男，陈露露，周荃，等．低温等离子体耦合技术去除水中有机污染物的研究进展[J]．环境污染与防治，2021，43(12)：1596－1601.
LIU Yanan，CHEN Lulu，ZHOU Quan，et al. Research advances of non-thermal plasma coupling technologies for the removal of aqueous organic pollutants [J]. Environmental Pollution & Control，2021，43(12)：1596－1601.

[8] 刘蕾，于丽，张秀丽．农村生活污水治理存在的问题及建议[J]．环境与发展，2023，35(3)：1－5，11.
LIU Lei，YU Li，ZHANG Xiuli. Problems and optimization measures of rural domestic sewage treatment [J]. Environment and Development，2023，35(3)：1－5，11.

[9] 汪琴，代佼，杨玖，等．边远山区农村生活污水治理难点及对策研究[J]．资源节约与环保，2023(6)：73－77.

[10] 周雪雪，赵伟华．美丽乡村视域下农村污水治理的现状与展望[J]．甘肃农业，2023(5)：97－100.

[11] 吕妍．氨氮等水质指标对水产养殖的影响及解决办法[J]．黑龙江水产，2021，40(5)：53－56.
LÜ Yan. Effects of water quality indexes such as ammonia nitrogen on aquaculture and solutions [J]. Northern Chinese Fisheries，2021，40(5)：53－56.

[12] 杨玉珍，王婷，马文鹏．水环境中氨氮危害和分析方法及常用处理工艺[J]．山西建筑，2010，36(20)：356－357.
YANG Yuzhen，WANG Ting，MA Wenpeng. On harms of ammonia and nitrogen in water environment and its analysis methods and common treatment craft [J]. Shanxi Architecture，2010，36(20)：356－357.

[13] SINGH S，KAUSHIK A，SHARMA B K. A study of nutrient removal efficiency from simulated agriculture run-off (SAR) using constructed wetland technology [J]. Nature Environment & Pollution Technology，2022，21(3)：1367－1374.

[14] 张翠雅，陈锋，国显勇，等．人工湿地净化海水养殖尾水的影响因素研究进展[J]．大连海洋大学学报，2023，38(5)：902－912.
ZHANG Cuiya，CHEN Feng，GUO Xianyong，et al. Research progress on the factors influencing mariculture wastewater treatment by constructed wetland：A review [J]. Journal of Dalian Ocean University，2023，38(5)：902－912.

[15] 于越，陈启璁，朱泓帆，等．垂直潜流湿地对低污染污水厂尾水的净化效果[J]．环境工程，2023，41(S1)：230－234.
YU Yue，CHEN Qicong，ZHU Hongfan，et al. Treatment effect of vertical flow constructed wetland on low-polluted tailwater from sewage treatment plants [J]. Environmental Engineering，2023，41(S1)：230－234.

[16] OBERHOLSTER J P，CHENG P，GENTHE B，et al. The environmental feasibility of low-cost algae-based sewage treatment as a climate change adaption measure in rural areas of SADC countries [J]. Journal of Applied Phycology，2019，31(1)：355－363.

[17] 魏晶晶．生态塘—人工湿地系统净化微污染河水的研究[D]．北京：北京林业大学，2019.
WEI Jingjing. Study on purification of micro-polluted river ecological pond-constructed wetland system [D]. Beijing：Beijing Forestry University，2019.

[18] PAN J，YUAN F，YU L，et al. Performance of organics and nitrogen removal in subsurface wastewater infiltration

systems by intermittent aeration and shunt distributing wastewater [J]. Bioresource Technology, 2016, 211: 774－778.

[19] 李文伟, 薛林贵, 莫天录, 等. 生物法处理农村生活污水工艺研究的进展[J]. 广州化工, 2016, 44(7): 5－8.
LI Wenwei, XUE Lingui, MO Tianlu, et al. Research progress on the technological study of domestic sewage treatment in rural area by biological method [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(7): 5－8.

[20] DIVYESH P, AAKASH P, AMOL S, et al. A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater [J]. Environmental Technology Innovation, 2020, 101261.

[21] 张建丽. 农村污水处理技术现状及发展趋势[J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(2): 10－12.
ZHANG Jianli. Current situation and development trends of rural sewage treatment technology [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2023, 36(2): 10－12.

[22] LI Y, LI H, XU X, et al. Application of subsurface wastewater infiltration system to on-site treatment of domestic sewage under high hydraulic loading rate [J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(1): 49－54.

[23] 刘震, 徐松, 岳峰. 生物法在农村生活污水处理中的工艺研究[J]. 住宅与房地产, 2017(6): 280.

[24] 徐文慧, 周锦云, 张俊. 低温等离子体技术处理难降解有机废水研究进展[J]. 江西化工, 2018(3): 40－43.
XU Wenhui, ZHOU Jinyun, ZHANG Jun. Research progress in organic wastewater treatment by low-temperature plasma discharge technology [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2018(3): 40－43.

[25] ZHAO Y Y, WANG T, WILSON M P, et al. Hydroxyl radicals and hydrogen peroxide formation at nonthermal plasma-water interface [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 2084－2091.

[26] ZHANG J, ZHENG J, YANG W. Co-degradation of ammonia nitrogen and 4-chlorophenol in a photoelectrochemical system by a tandem reaction of chlorine and hydroxyl radicals [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 226: 115813.

[27] 许允之, 章金, 袁丽梅, 等. 基于等离子体技术的污水处理[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(4): 66－70.
XU Yunzhi, ZHANG Jin, YUAN Limei, et al. Sewage treatment based on plasma technology [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(4): 66－70.

[28] 曾伟昌. 环境工程污水处理中等离子体技术的运用[J]. 农技服务, 2017, 34(10): 170.

[29] 王照. 等离子体技术在废水处理中的应用[J]. 冶金与材料, 2019, 39(3): 76, 78.

[30] 丛来欣, 黄明明, 章建浩, 等. 高压电场低温等离子体对马拉硫磷的降解效能及降解途径[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 37－42, 47.
CONG Laixin, HUANG Mingming, ZHANG Jianhao, et al. Degradation efficiency and pathway of malathion treated by high voltage electric field cold plasma [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 37－42, 47.

[31] LI S, MA X, JIANG Y, et al. Acetamiprid removal in wastewater by the low-temperature plasma using dielectric barrier discharge [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2014, 106: 146－153.

[32] WU H, FAN J, CHEN W, et al. Dielectric barrier discharge-coupled Fe-based zeolite to remove ammonia nitrogen and phenol pollutants from water [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 243: 116344.

[33] BACK S, SAITO N, LEE S. A facile and efficient approach for the removal of high concentrations of ammonia nitrogen in wastewater: Liquid-phase plasma treatment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(1): 109075.

[34] 李芳, 白敏冬, 洪伟辰, 等. 羟基自由基快速致死水华针杆藻的研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 550－556.
LI Fang, BAI Mindong, HONG Weichen, et al. Effect of hydroxyl radicals on the removal of Synedra sp. in water blooms [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 550－556.

[35] 依成武, 李倩倩, 何聪, 等. 强电离放电对铜绿微囊藻的杀灭效果[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 65－68.
YI Chengwu, LI Qianqian, HE Cong, et al. Experiment on strong ionization discharge killing microcystis aeruginosa [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(1): 65－68.

[36] 蒲思川, 边娜, 刘钊, 等. 双通道放电低温等离子体灭活螺旋鱼腥藻研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2022, 35(3): 80－87, 94.
PU Sichuan, BIAN Na, LIU Zhao, et al. Study on inactivation of Anabaena spiroides by dual channel discharge low temperature plasma [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2022, 35(3): 80－87, 94.

[37] WANG X Q, WANG F P, CHEN W, et al. Non-equilibrium plasma prevention of Schistosoma japonicum transmission [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35353.

[38] 张启富. 低温等离子体污水处理技术与应用实验研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2 018.
ZHANG Qifu. Experimental study on low-temperature plasma technology and application intreatment of polluted wastewater application [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2018.

Development status and trends of plasma treatment of rural sewage

WANG Ranran[1, 2], ZHANG Fan[1], QI Kai[3], WANG Guangrong[4], ZHANG Wenjuan[5], SHEN Xiaoran[5], FAN Meina[5], LIU Shuangxi[1, 2*]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*; 2. *Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*; 3. *Shandong Wuzhou Electrical Co. Ltd., Weifang* 261000, *China*; 4. *Sinoma (Nanjing) Mining Research Institute Co. Ltd., Nanjing* 211100, *China*; 5. *Shandong Greenblue Biotechnology Co. Ltd., Tai'an* 271400, *China*)

Abstract: In recent years, the improvement of living standards in rural areas of developing countries and the continuous upgrading of rural industrial economy have led to increasingly serious rural sewage discharge. The rural sewage from production and domestic wastewater, agricultural tailwater, and aquaculture wastewater seriously damages the ecological environment, affecting residents' well-being and economic development. This paper points out the limitations of traditional ecological methods and biological treatment methods, such as long treatment cycles, significant environmental impact, and secondary pollution. Furthermore, it further discusses the advantages of plasma technology in treating rural sewage, including its wide application range, high treatment efficiency, and absence of secondary pollution, filling the gap in the application of plasma technology in agricultural wastewater treatment. Although some reaction mechanisms of plasma are still unclear, and the requirements for equipment are relatively high, which still need to be continuously improved. However, in the future, by combining with other technologies, the efficiency and application range of plasma technology can be further improved, enabling it to play a greater role in optimizing and improving the comprehensive treatment process of rural sewage in developing countries.

Keywords: plasma; rural sewage; ecological treatment; biological treatment