

风-光互补驱动农村污水生物-物理耦合多级处理系统开发

李桂兰¹, 马尚彬^{1,2}, 李鹏宇^{2,3}, 李轶霄^{2,4}, 杜宇鹃⁴, 郑天龙^{2,3,✉}, 李炜⁵, 刘建国¹, 刘俊新^{2,3}

1. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院, 环境污染控制与修复内蒙古自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 内蒙古工业大学土木工程学院, 呼和浩特 010051; 5. 内蒙古自治区环境科学学会, 呼和浩特 010011

摘要 目前, 清洁能源应用于污水处理领域最大的挑战是易受天气状况影响导致电能无法稳定输出, 负载无法连续正常工作。因此, 为保证电能的稳定输出和设施正常运行, 采用风-光互补蓄电池供能模式, 通过对不同季节太阳能和风能强度变化监测与分析, 确定太阳能与风能具有季节互补性。在此基础上, 设计了风-光互补驱动农村污水生物-物理耦合多级处理设施的集成系统, 采用生物和物理技术的耦合实现高效稳定去除污水中的污染物。202 d 连续运行实验结果表明: 通过系统的效能分析, 证明风能对于太阳能发电的补充, 有效地提高了供电系统的稳定性, 实现发电系统电能输出稳定, 且能源利用率可达 90% 以上; 系统对污水中 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 和 SS 的去除率分别为 86.73%±2.89%、87.82%±6.59%、75.63%±11.79%、78.65%±6.39%、94.59%±0.89%; 出水满足《内蒙古自治区农村生活污水处理设施污染物排放标准(试行)》(DBHJ/001-2020) 一级标准。研究结果证明利用风-光能互补驱动生物物理耦合处理农村生活污水可行。

关键词 风-光互补发电; 生物-物理耦合; 农村污水处理; 效能分析

近年来, 随着乡村振兴战略的实施和社会经济的加速发展, 农村地区的污水排放量和污染物成分复杂度也在逐年提高^[1-2], 污水中各类污染物的排放标准越来越严格, 水资源污染状况也变得尤为突出^[3]。目前, 农村污水中的水质水量变化系数大, 且处理技术过程相对复杂^[4], 导致农村地区的水资源污染状况不断加剧^[5], 传统的农村污水处理设施存在着运行能耗高、难以长效运行^[6]、后期投入经费大、出水水质不稳定等问题^[7]。加之农村污水传统处理工艺运维难^[8], 运行过程相对复杂, 其中生物处理技术由于其自身运行能耗高^[9], 而且北方极端低温条件导致微生物活性降低, 使得设施处理效果较差, 最终导致农村污水处理设施运行不稳定或出现处理设备“晒太阳”等现状^[10-11]。

基于村镇地区技术人员少、运维力量相对薄弱等客观条件^[12], 本系统采用风-光互补发电驱动, 通过可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC) 以实现基于无人值守、少维护为核心特点的低能耗高效污水处理, 生物和物理处理技术的耦合, 实现两者的协同作用去除污水中污染物, 针对冬季低温的环境中微生物活性较弱处理效果不佳的情况, 本系统可以最大限度的利用物理处理工艺的作用, 有效改善北方村镇普遍存在的污水处理设施冬季运行效果差的问题。本研究通过对太阳能和风能的变化规律及对应不同气象条件下发电量、用电量效能进行分析, 对生物物理耦合处理系统污染物去除效果的研究, 在一定程度上对推动风-光互补驱动农村生活污水处理的规模化应用提供指导意见。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

1) 发电系统。风-光互补发电系统由太阳能电池板(英利 YL330CELL×5, 330W33V9A, 中国)、光伏控

收稿日期: 2023-09-13; 录用日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51838013); 内蒙古自治区“草原英才”工程创新创业人才团队

第一作者: 李桂兰(1974—), 女, 硕士, 副教授, 465646162@qq.com; ✉通信作者: 郑天龙(1988—), 男, 博士, 副研究员, tlzheng@rcees.ac.cn

制器(光合硅能 MPPT 通用型 40A 12V24V36V48V 自适用 40A, 中国)、风力发电机(NE-400R, 400 W 24V400W, 中国)、风力充电控制器(NE-300400 24V400W, 中国)、逆变器(方超 2500-E-24 24V2500W)、蓄电池(圣阳电源 GFM-200C×12 2V200Ah (C10, 1.8V/只), 中国)、接触器(施耐德 LC1-D40, 法国)等组成。太阳能电池板的面积为 10.0 m²; 风机采用垂直轴风力发电机, 风轮叶片直径 0.8 m。风力发电和光伏发电分别通过风机和光伏控制器给蓄电池充电, 由于受到气候条件的限制, 发电规律与负载的用电要求并不一致, 因此需要配备储能装置。最后通过逆变器将蓄电池储存的直流电转换为负载所需的交流电, 来满足负载用电的需要。

2) 实验装置。本实验装置如图 1 所示, 由风-光互补发电单元(图 1(a))、自控及储能单元(图 1(b))、生物物理耦合反应器(图 1(c))组成。生物物理耦合反应器的总有效容积 1 100 L, 工艺选择采用两级 A/O+物理过滤+紫外灭菌的污水处理系统。基于西北地区自身优势, 风能、太阳能资源丰富, 利用风-光互补发电为装置供电。本装置的设计处理水量为 2.0 m³·d⁻¹, 厌氧池、好氧池、缺氧池、好氧池按 1:2:1.5:2.5 的比例设计。系统运行时, 进水由污水泵从原水池供给, 原水首先进入调节池, 经生物段处理后, 流入物理段过滤吸附。

3) 运行方式。实验于 2022 年 4 月底开始启动, 连续运行 202 d。厌氧池、一级好氧池、缺氧池、二级好氧池、一级过滤池和二级过滤池溶解氧浓度分别为 (0.02±0.12)、(2.68±1.15)、(0.11±0.44)、(2.93±1.36)、(0.31±0.15) 和 (0.03±0.07) mg·L⁻¹, 水力停留时间为 14 h, 保证设备 24 h 连续运行。装置启动期间每隔 1 d 进行 1 次进出水水质检测, 每隔 5 d 进行 1 次各个反应区水质检测。直到 COD 去除率和 NH₄⁺-N 去除率稳定达到 80% 以上, 且可用肉眼观察到生物膜厚度约有 1 mm 左右或者生物膜上镜检观察到变形虫、轮虫和线虫等微生物, 即表明启动挂膜成功^[13]。

实验设备位于内蒙古自治区土默特左旗察素齐镇某村, 污水来自日常生活化粪池污水(包括灰水和黑水), 属于低碳氮比污水(简记为 C/N, 指 COD/TN), C/N 在 3.06 左右。具体水质情况和理化情况见表 1 所示。

1.2 检测方法

本研究结合生活污水污染物特征主要对污水中的 COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS、pH 等进行检测。COD 采用快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007)测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定, TP 采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989)测定, SS 采用重量法(GB/T 11901-89), pH 采用(MIK-PH(ORP)6.0-CN7, 美控, 中国)测定, DO 采用(MIK-DY2016-CN2, 美控, 中国)测定。

实验中太阳能辐射强度采用太阳能辐射测量仪(华控兴业 HSTL-FSDJY)检测并记录, 风速采用风速测定仪(华控兴业 HSTL-FS01)检测并记录, 太阳能和风力实时发电强度、太阳能和风能发电量、反应器各工况的运行时长等, 均通过相应的电子传感器与 PLC(FX2N-40M, 天津佳创科技发展有限公司, 中国)检测并记录, 能耗由电量表实时记录。



图 1 实验装置实物图

Fig. 1 Physical diagram of the experimental setup

表 1 系统进水水质

Table 1 System influent water quality

序号	参数	浓度范围/(mg·L ⁻¹)	均值±标准差/(mg·L ⁻¹)
1	COD	108.00~453.00	211.61±47.00
2	NH ₄ ⁺ -N	40.18~104.80	57.81±12.17
3	TN	54.40~108.90	63.22±7.95
4	TP	3.10~7.30	4.91±0.94
5	SS	72.14~243.10	127.31±36.79
6	pH	7.08~8.24	7.75±0.22

1.3 全生命周期成本评价方法

全生命周期成本 (life cycle cost, LCC) 是一个建筑物或建筑物系统在一段时期内的拥有、运行、维护和拆除的总折现后的货币成本^[14-15], 被广泛应用于污水处理领域中, 国际标准 ISO14040 将 LCC 定义为系统在整个生命周期内 (包括建设、运行与报废处理) 的输入、输出和潜在环境影响的汇编与评价^[16], 并且随着污水处理领域从单一的污染物去除目标已逐步向低能耗, 甚至能源回收方向发展^[17]。通过对比不同运行模式下全生命周期成本, 确定本研究采用的供能模式, 可最大程度节约投资成本。全生命周期成本=建设成本+运行成本-净残值, 其数学模型表示如式 (1)、式 (2) 所示。

$$LCC = \sum_{k=1}^m C_k + \sum_{t_0=1}^{T_0} \sum_{h=1}^n C_h \left(\frac{1+f}{1+r} \right)^{t_0} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^p \frac{C_i}{(1+r)^t} - S \quad (1)$$

$$r = CPI \times i + CPI + i \quad (2)$$

式中: C_k 为各项建设成本或初始化成本; C_h 为后期投资 (各设备更新成本); C_i 为各年运行成本或未来运行成本; t_0 为污水设备更新时的时间变量; f 为通货膨胀率, 参考 CPI 指数; r 为折现率; S 为净残值; T 为全生命周期; t 为运行成本计算的时间变量。

2 结果与讨论

2.1 实验区风能太阳能资源禀赋分析

本实验装置所在地, 内蒙古自治区土默特左旗察素齐镇某村 (经度 111.182 333°, 纬度 40.700 645°), 供能方式采用风光互补发电蓄电池供能的方式, 发电效果一定程度上会受到环境条件的影响。太阳能发电主要受到太阳辐射度和环境温度的影响^[18]。风能的随机性较强, 受风速及风向的影响较大^[19]。风力发电作为太阳能发电的补充, 可提高供电的稳定性, 增强系统对不同气象条件的适应性。除此之外, 降雨量、湿度、空气质量以及空气穿透率等也可能直接或间接影响发电效率。因此, 调研并分析了该地 2020 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日两年不同季节下的风速、太阳辐射强度、湿度、降水量、空气质量指数和空气穿透率数据, 数据来源于美国 NASA 数据官网。具体如下图 2 所示。

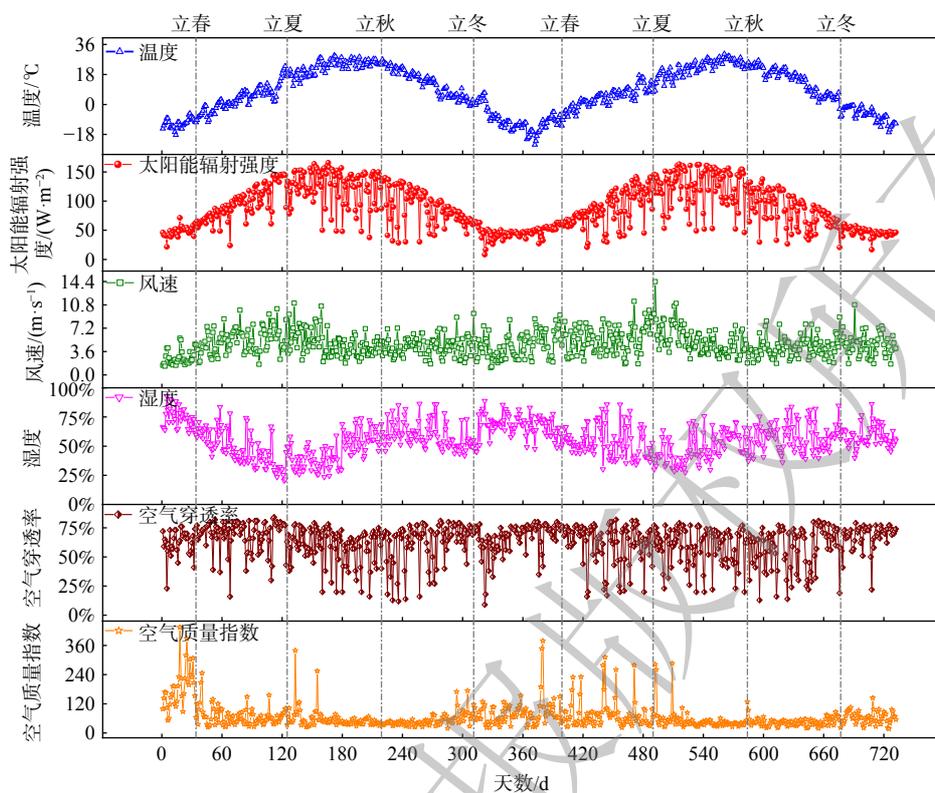
试验区所在地气候属于典型的温带大陆性气候, 主要气候特征是冬季严寒漫长、春季风大少雨, 夏季温热短促, 秋季气温剧降; 昼夜温差大, 日照时间充足, 无霜期短。由图 2 分析结果显示, 试验地环境温度和太阳辐射强度的年际变化均呈现抛物线型, 周期性、季节性规律极为显著; 其中湿度表现为春、夏季较低, 在秋、冬季较高; 降水量的多少与气温高低基本相同, 形成在气温较高的月份降水最多, 气温较低的月份降水最少, 因此降雨主要集中在夏季, 春秋两季分布均匀, 冬季最少; 空气穿透率的年际变化规律不明显, 且由于易受周围环境影响, 春、夏、秋、冬的波动均比较明显, 尤其夏秋季节; 空气质量指数在春季和冬季较差, 夏季和秋季空气质量优于其他 2 个季节。

对于太阳辐射强度, 由于试验地区主要以晴好天气为主, 能见度高, 空中云层遮挡较少的原因, 辐射强度随四季变化呈现先升高后降低的趋势, 夏季日照时间较春季更长, 为 13 h 左右, 太阳辐射强度最大日均值为 $165.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。春、秋季, 太阳辐射强度变化曲线较为相似, 但随时间变化更为剧烈, 持续时间更短。冬季太阳辐射强度峰值为全年最低, 均值为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 且持续时间较其他季节最短, 冬季日照时长为 9 h 左右。由图可知, 春、夏、秋、冬四个季节的太阳辐射度变化范围分别为 (92.63 ± 37.22) 、 (125.20 ± 25.31) 、 (86.07 ± 32.08) 和 $(47.89 \pm 32.31) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。就平均风速而言, 春、夏、秋、冬 4 个季节的变化范围分别为 (5.59 ± 2.14) 、 (5.22 ± 2.14) 、 (4.45 ± 1.50) 和 $(3.71 \pm 1.94) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此, 平均风速在年际变化上无明显规律, 春、夏 2 季平均风速略大于秋、冬季节, 特别是在春夏更替时, 平均风速基本能达到 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。

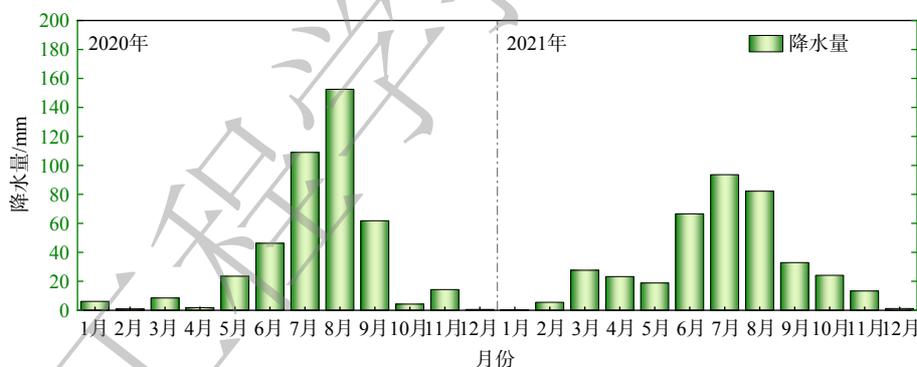
综上所述, 将风能和太阳能相互结合发电, 可以在太阳能较为短缺的冬季以及某些太阳辐射强度较弱的天气情况下, 有一定的补充作用, 相比单一光伏发电模式整体效能更加稳定。

2.2 风-光互补发电系统效能分析

在实验期间, 对反应器运行稳定后光伏发电板和风力发电机的发电量、负载用电量以及相对应的能源利用率进行了为期 202 d 的时间序列实验连续监测, 结果如图 3 所示。



(a) 试验区2020年—2021年温度、太阳能辐射强度、风速、湿度、空气穿透率、AQI值的变化



(b) 试验区2020年—2021年月降水量的变化

图 2 试验区 2020 年—2021 年气候特征及自然能源禀赋

Fig. 2 Climate characteristics and natural energy endowment of the experimental area in 2020—2021

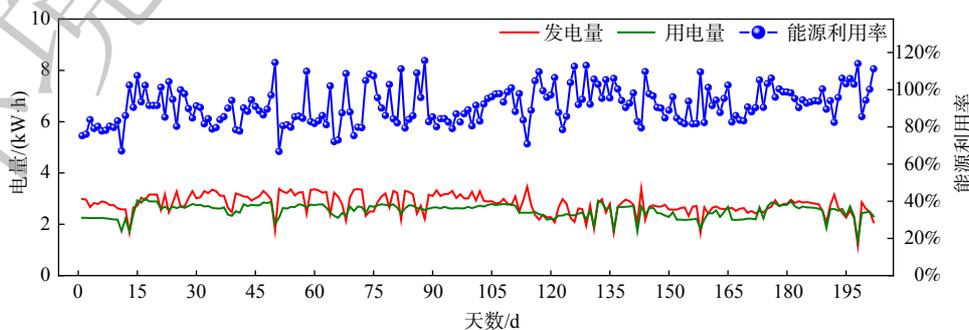


图 3 风-光互补发电系统能量供给效能分析

Fig. 3 Analysis of energy supply efficiency of wind-solar hybrid power generation system

由图 3 可以看出,运行期间,日均发电量变化范围为 (2.78±0.39) kW·h,日均用电量变化范围为 (2.52±0.27) kW·h,能源利用率(用电量/发电量)变化范围为 91.49%±10.03%。太阳能发电量的变化范围为 (2.57±0.34) kW·h,风力发电量的变化范围为 (0.21±0.14) kW·h。太阳能、风能占总发电量的总体比重分别为 92.32%±4.56%、7.68%±4.56%,因此可以看出系统主要以太阳能发电为主,风机发电为补充,有效地提高了供电系统的稳定性。

图 4 是风-光互补发电系统中光伏发电功率、风机发电功率随时间变化曲线,以系统运行 202 d 为监测周期。由图 4 分析可知,风-光互补发电系统中光伏功率随时间变化曲线呈现出先升高后降低的趋势,然而风机功率随时间变化曲线则呈现无规则变化,主要原因是来自其风速本就不稳定所致,因此风力发电的随机性较强,供电稳定性和强度较弱。对图 4 两曲线分别进行数学积分统计,图中阴影总面积即当日风-光互补发电系统在自控系统干预之下的电力输出。由此可以得出风-光互补发电系统在一天期间光伏发电系统输出电力均值为 2 620 W·h;风机发电系统输出电力均值为 166 W·h,总发电量累计输出电力均值为 2 786 W·h,其中太阳能、风能占总发电量的总体比重分别为 94.04%、5.96%,和图 3 分析结论基本符合。因此,风-光互补发电模式保证了发电系统稳定的电力输出。

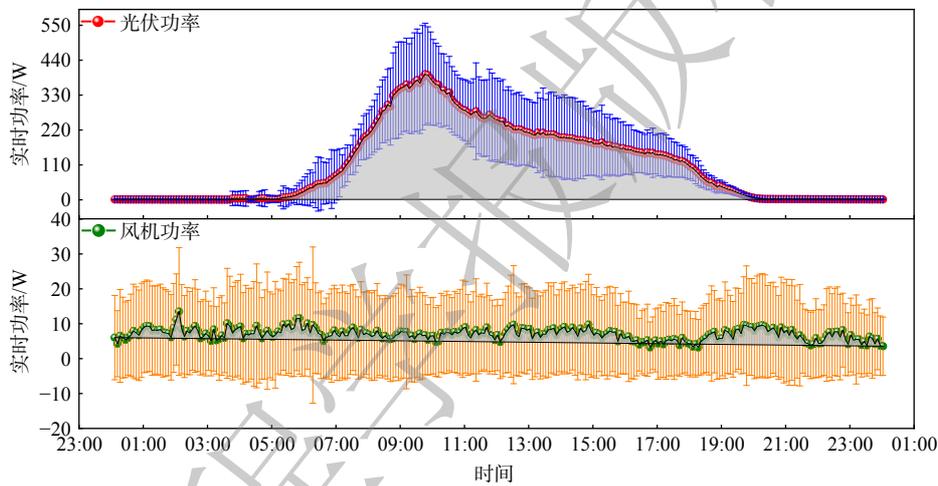


图 4 风-光互补发电系统的电力输出特征

Fig. 4 Power output characteristics of wind-solar hybrid power generation system

2.3 污染物去除效果分析

对污水处理反应器进行了 202 d 的数据监测,期间重点考察了系统对 COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS 的去除效果。系统各单元水质检测浓度均值情况见表 2,系统对各污染物去除效果结果见图 5 所示。

表 2 系统各反应单元水质浓度均值情况表

Table 2 Mean water concentration of each reaction unit of the system

项目名称	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)
进水	211	57.81	63.2	4.9	127.31
A1	176	46.32	52.6	4.4	71.30
O1	130	33.85	39.7	3.8	46.31
A2	98	26.05	32.8	3.5	24.79
O2	49	11.87	20.2	2.9	16.29
一级过滤池	40	10.05	17.8	1.6	9.14
二级过滤池(出水)	28	7.04	15.3	1.0	6.83

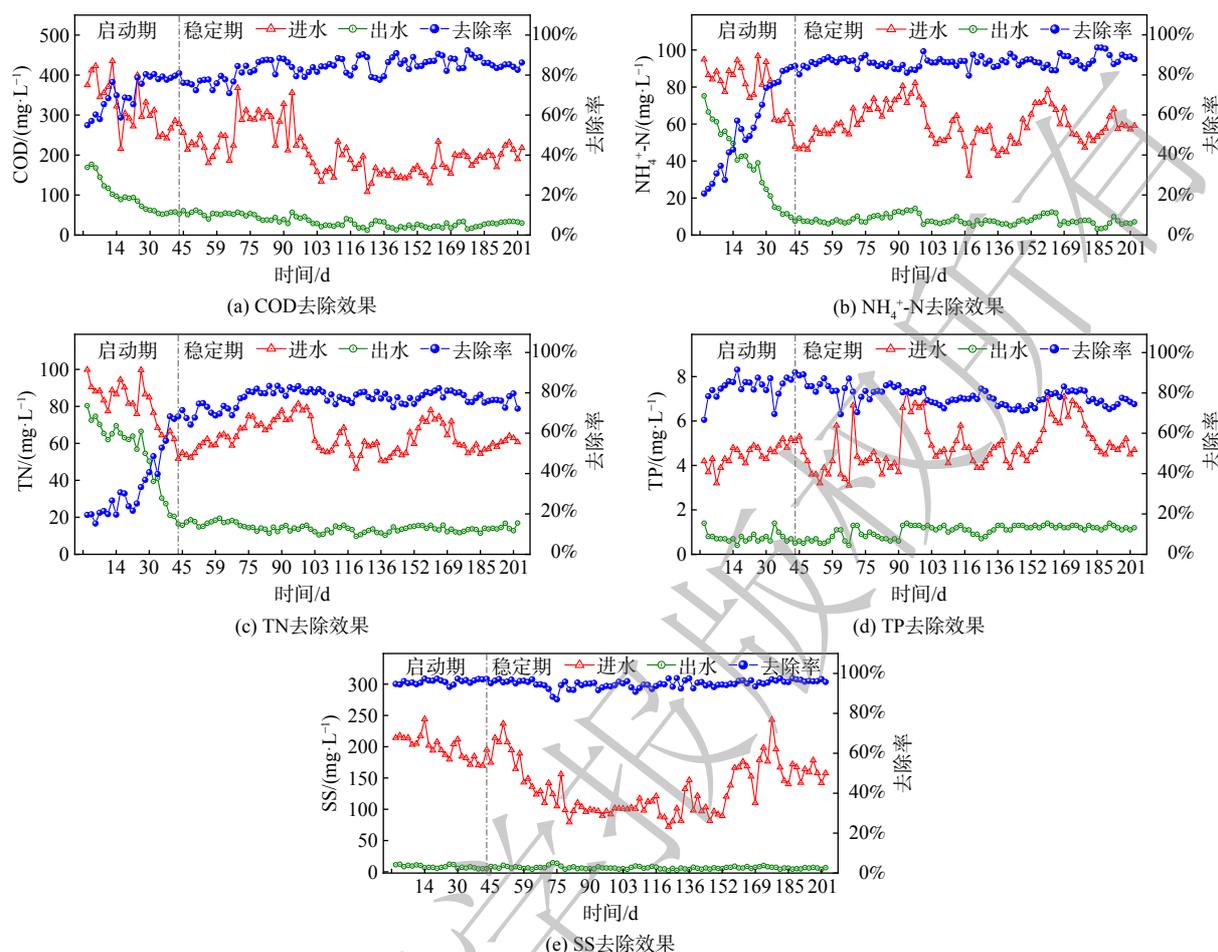


图 5 系统对 COD(a)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b)、TN(c)、TP(d) 和 SS(e) 去除效果

Fig. 5 The removal effect of the system on COD(a), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b), TN(c), TP(d) and SS(e)

如表 2 和图 5 所示, 系统对于 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、SS 去除率分别为 $86.73\% \pm 2.89\%$ 、 $87.82\% \pm 6.59\%$ 、 $75.63\% \pm 11.79\%$ 、 $78.65\% \pm 6.39\%$ 、 $94.59\% \pm 0.89\%$, 其中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、SS 进水浓度均值分别为 (211.61 ± 47.00) 、 (57.81 ± 12.17) 、 (63.22 ± 7.95) 、 (4.91 ± 0.94) 、 $(127.31 \pm 36.79) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 出水浓度均值分别为 (28.60 ± 15.5) 、 (7.04 ± 6.97) 、 (15.30 ± 11.25) 、 (1.04 ± 0.30) 、 $(6.38 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由图 5 可以看出, 进水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN、TP、SS 浓度有较大幅度的波动, 但系统出水水质仍保持稳定, 说明本系统具有较强的抗冲击负荷能力^[20]。此外, 系统中的 COD 主要在生物段被反应去除, 厌氧池中因溶解氧和硝态氮结合氧的消耗而呈厌氧状态, 易生物降解 COD 被聚磷菌^[21]和反硝化细菌等异养型微生物代谢活动去除^[22]。好氧池中的微生物在适宜的温度、溶解氧及曝气条件下, 通过吸附、氧化并分解水中的大部分有机物, 并将进水中的大部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[23]。生物物理耦合处理系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除效率均表现出随着运行历时而增加且稳定的趋势, 这与系统采用两段缺氧和好氧, 耦合物理过滤吸附模块有关, 集生物法和物理法的优点, 起到高效去除污染物作用的同时保证了在不同水力负荷下仍可稳定运行。对于系统脱氮效率较低的原因主要是进水碳源不足、碳氮比偏低^[24], 以及系统内部缺氧好氧交替不够充分也影响反硝化效果^[25]。系统对 TP 的去除效率不具有相同的规律, 物理段投加了高效的除磷滤料虽可以实现污水中 TP 的达标, 但是通过对 TP 的去除监测发现, 去除率具有降低的趋势, 这是由于生物法除磷较为稳定, 但是物理除磷中滤料对于污水中磷酸盐吸附量达到一个饱和值后会随着时间的增加^[26], 其对 TP 的去除率表现为先迅速升高并趋于稳定, 随后表现出略微下降的趋势。因此对 TP 的去除具有一定的影响。同时由表 2 可得, 系统中生物段对于 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 和 SS 的去除贡献率 (去除量/总体去除量) 分别为 88.52%、90.48%、89.77%、51.28%、92.15%; 物理段对于 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 和 SS 的去除贡献率

(去除量/总体去除量) 分别为 11.48%、9.52%、10.23%、48.72%、7.85%。由此可见，各污染物的去除主要依靠生物段的作用进行去除，物理段主要实现对于 TP 的辅助去除。综上，系统出水水质中 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 和 SS 均可满足《内蒙古自治区农村生活污水处理设施污染物排放标准(试行)》(DBHJ/001-2020) 一级标准。

2.4 相关性分析

通过皮尔曼 (Spearman) 相关性矩阵分别探究了气象条件对系统发电量的影响和系统发电量对系统运行处理效果的影响。图 6(a) 表征了气象条件和系统发电量、用电量的相关性。分析结果显示，发电量与用电量、辐射强度、风速、温度、湿度、降雨量、空气质量指数、空气穿透率相关系数分别为 0.59、0.68、0.13、0.32、-0.58、-0.32、0.12、0.31。发电量与辐射强度、温度、空气穿透率相关性显著 ($P < 0.05$)；与湿度、降水量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。本系统中设计的风力发电量约占总发电量的 10% 左右，大部分电量来源于光伏发电，太阳辐射强度是决定光电转化效率及光伏系统效率的重要因素之一，其直接关系到整个系统的平均功率输出^[27]。同时，有前面的结论，辐射强度和温度随四季变化的曲线趋势相似，呈先升高后降低的趋势，两者之间的吻合度较高，表现出温度越高，辐射强度也是较高。空气穿透率是指光线通过大气层时所受到的阻碍程度，空气穿透率越高，光线在通过大气层时受到的阻碍越小，光照强度越高发电的效率就越高^[28]。然而湿度和降雨主要是通过影响光照强度来体现。在降雨天气中，云层密集，光照强度会减弱，从而降低光伏发电的效率。雨水可能会在光伏板表面形成水膜，降低光的透过率，进一步降低光伏发电的效率。湿度主要是通过水蒸气含量对光的吸收和散射来体现。湿度越高，大气中的水蒸气含量越大，可能会增加光的散射和吸收，降低光伏发电的效率。

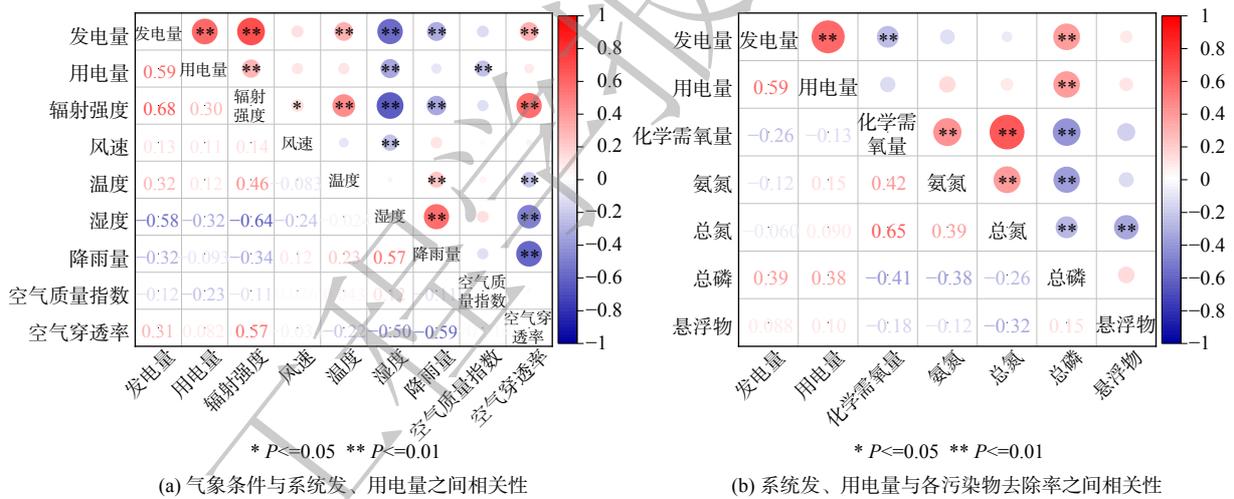


图 6 系统发电量、用电量与环境因素和各污染物去除率之间的相关性热图

Fig. 6 Heat map of the correlation between system power generation and electricity consumption and environmental factors and the removal rate of each contaminant

图 6(b) 表征了系统发电量、用电量与各污染物去除率之间相关性。分析结果显示，发电量与用电量、COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS 去除率相关性较弱，但是通过分析可以看出 COD、NH₄⁺-N、TN 之间的去除相关性显著。分析原因，当污水处理系统的有机物去除效果较好时，NH₄⁺-N 和 TN 的去除效果也会相应较好。这是因为有机物的降解过程会产生一些有机氮化合物，而污水处理系统中的一些工艺(如生物脱氮)可以将这些有机氮化合物转化为 NH₄⁺-N，并进一步去除。

综上所述，气象条件显著影响系统的发电效果，发电量进一步影响系统对于各污染物的处理效果，但影响不显著。

2.5 全生命周期成本分析

本研究采用 LCC 分析此污水处理设备中常规市电供电(模式-I)、风-光互补蓄电池供电(模式-II) 2 种模式的建设、安装、运行、设备更新及报废成本。按照光伏发电板和风力发电机的工作时长将评价体系的生

周期设计为 25 年。通过对比全生命周期成本确定本研究采用的供能模式可最大程度节约投资成本。

下表列出了 2 种模式的建设和投资清单。净残值 S 取固定资产原值的 4% 计算, 根据央行数据得知, 2016—2021 年期间 CPI 的平均值为 2%, 贷款利率 $i=4.75\%$ (2021 年), 则计算出 $r=6.845\%$, 根据其公式进行计算, 计算结果见表 3。

由表 3 可以看出, 根据全生命周期成本评价, 本系统 25 年内建设成本和运维成本的总和为 21 040 元, 而常规市电供能的运行模式下建设成本和运维成本总和为 27 185 元, 风-光互补蓄电池供能模式系统基建投资总成本相对于常规市电供能模式降低了 22.60%, 因此相比于常规市电供能运行的模式, 该系统模式成本较低、经济性较好。

3 结论

1) 采用风-光互补蓄电池供能驱动污水处理模式, 202 d 的连续运行实验结果显示, 系统对 COD 、 NH_4^+ - N 、 TN 、 TP 和 SS 的去除率分别为 $86.73\% \pm 2.89\%$ 、 $87.82\% \pm 6.59\%$ 、 $75.63\% \pm 11.79\%$ 、 $78.65\% \pm 6.39\%$ 、 $94.59\% \pm 0.89\%$, 出水水质满足《内蒙古自治区农村生活污水处理设施污染物排放标准(试行)》(DBHJ/001-2020) 一级标准。

2) 通过对风-光互补发电系统的效能分析, 证明风能对于太阳能发电的补充有效地提高了供电系统的稳定性, 实现发电系统电能输出稳定, 且能源利用率达到 90% 以上。

3) 通过皮尔曼 (Spearman) 相关性矩阵分析发现, 气象条件显著影响系统的发电效果, 系统发电效果进一步影响系统对于各污染物处理效果, 但影响不显著。

4) 风-光互补蓄电池供能模式系统基建投资总成本相对于常规市电供能模式降低了 22.60%, 在环境友好性和可持续性的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 丁建军, 杨云波. 农村生活污水治理现状及技术应用比较研究[J]. 资源节约与环保, 2022(8): 141-144.
- [2] 张永平, 李妮, 温静静, 等. 光伏驱动一体化装置处理农村生活污水的性能研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 599-604.
- [3] 肖斯斯, 陈鑫, 周伟, 等. 竖流式一体化反应器处理乡镇污水的影响因素[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 116-119+124.
- [4] 谢文玉, 李德豪, 钟华文, 等. 一体化 A/O 生物膜反应器脱氮特性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 570-574.
- [5] HAN C, LIU J, LIANG H, et al. An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(2): 274-279.
- [6] 梁和国, 高绣纺. 中国太阳能微动力净化槽技术研究初探[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 24-26+80.
- [7] 蔡铭杰, 马宏瑞, 刘俊新, 等. 太阳能驱动分散型污水处理系统及其自动化控制研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 118-123.
- [8] 李鹏宇, 刘俊新, 郑天龙, 等. 无蓄电池风-光能互补驱动生物反应器处理农村生活污水的可行性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2429-2436.
- [9] 黄田, 郑淋峰, 罗彬, 等. 高寒高海拔地区农村生活污水治理模式探讨[J]. 资源节约与环保, 2023(3): 89-93.
- [10] 颜鲁薪, 甄箫斐, 雒苗, 等. 基于太阳能光伏光热的污水处理系统[J]. 中国沼气, 2023, 41(2): 65-75.
- [11] SONI A, STAGNER J A, TING D S K. Adaptable wind/solar powered hybrid system for household wastewater treatment[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2017, 24: 8-18.
- [12] HAN Y, MA J, XIAO B, et al. New Integrated Self-Refluxing Rotating Biological Contactor for rural sewage treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 324-334.
- [13] 孙广根. 改性组合填料生物接触氧化强化去除微污染河水氮磷效能及机理研究[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [14] 黄辉, 张勤, 傅斌. 基于全生命周期成本理论的污水厂投资方案比较[J]. 中国给水排水, 2013, 29(1): 101-104.
- [15] 何津津. 基于生命周期评价的光伏发电碳排放研究[D]. 南京航空航天大学, 2017.
- [16] COROMINAS L, FOLEY J, GUEST J S, et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art[J]. *Water Research*, 2013, 47(15): 5480-5492.
- [17] ROEFS I, MEULMAN B, VREEBURG J H G, et al. Centralised, decentralised or hybrid sanitation systems Economic evaluation under urban development uncertainty and phased expansion[J]. *Water Research*, 2017, 109: 274-286.
- [18] 李立雄, 阳同光, 袁越阳, 等. 基于改进有限集模型预测控制策略的光伏发电系统最大功率点追踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 28-37.
- [19] 邢月. 风电机组运行状态监测与健康维护关键技术研究[D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [20] LI P, ZHENG T, LI L, et al. An appropriate technique for treating rural wastewater by a flow step feed system driven by wind-solar hybrid power[J]. *Environ*

- Research, 2020, 187: 109651.
- [21] DU R, CAO S, LI B, et al. Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters[J]. *Water Research*, 2017, 108: 46-56.
- [22] 高小波. 改良型多级 A/O 工艺处理低碳源生活污水实验研究[D]. 兰州交通大学, 2016.
- [23] 陈祥瑞, 杜强强, 韩文杰, 等. 基于纯膜 MBBR 的紧凑型污水处理 BFM 中试基质转化特性[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3741-3756.
- [24] 崔鹏. A/O 生物接触氧化—垂直流人工湿地组合工艺处理生活污水试验研究[D]. 兰州交通大学, 2017.
- [25] 罗锋, 盛德洋, 张忠祥, 等. 生物接触氧化法去除微污染水中氨氮的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(20): 109-115.
- [26] VIDAL B, HEDSTROM A, HERRMANN I, et al. Phosphorus reduction in filters for on-site wastewater treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, 22: 210-217.
- [27] 陈晓东, 张福祥. 现阶段光伏发电系统中发电量影响因素研究[J]. *中国高新科技*, 2022(24): 16-19.
- [28] 魏晨晨, 王超, 李想, 等. 光伏组件发电效率影响因素分析[J]. *建设科技*, 2023(1): 79-81.
- (责任编辑: 金曙光)

Wind-solar complementation drives the development of bio-physical coupling multi-stage treatment system for rural sewage

LI Guilan¹, MA Shangbin^{1,2}, LI Pengyu^{2,3}, LI Yixiao^{2,4}, DU Yujuan⁴, ZHENG Tianlong^{2,3,*}, LI Wei⁵, LIU Jianguo¹, LIU Junxin^{2,3}

1. College of Resources and Environmental Engineering, Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Laboratory of Water Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 5. Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Science Society, Hohhot 010011, China

*Corresponding author, Email: tlzheng@rcees.ac.cn

Abstract At present, the biggest challenge in the application of clean energy in the field of sewage treatment is that it is susceptible to weather conditions, resulting in unstable output of electric energy and continuous normal operation of the load. Therefore, in order to ensure the stable output of electric energy and the normal operation of facilities, the wind-solar hybrid battery energy supply mode was adopted, and the seasonal complementarity of solar and wind energy was determined by monitoring and analyzing the changes of solar and wind energy intensity in different seasons. On this basis, an integrated system of wind-solar complementary driving bio-physical coupling multi-stage treatment facilities for rural sewage was designed, and the coupling of biological and physical technology was used to achieve efficient and stable removal of pollutants in sewage. The results of 202 days of continuous operation showed that through the efficiency analysis of the system, it was proved that wind energy can supplement solar power generation, effectively improve the stability of the power supply system, realize the stable power output of the power generation system, and the energy utilization rate can reach more than 90%. The removal rates of COD, NH₄⁺-N, TN, TP and SS in sewage were 86.73%±2.89%, 87.82%±6.59%, 75.63%±11.79%, 78.65%±6.39%, 94.59%±0.89%, respectively. The effluent met the first-level standard of the Inner Mongolia Autonomous Region Pollutant Discharge Standard for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities (Trial) (DBHJ/001-2020). The results proved that it was feasible to use wind-solar energy complementarity to drive biophysical coupling to treat rural domestic sewage.

Keywords wind-solar hybrid power generation; bio-physical coupling; rural sewage treatment; performance analysis