



光伏与“光伏+水务”在污水处理厂的应用现状

钱媛媛^{1,2}, 王永杰^{1,3}, 杨雪晶^{1,3}

(1. 华东理工大学上海工业水系统精益运营工程技术研究中心, 上海 200237; 2. 麦王环境技术股份有限公司, 上海 200135; 3. 华东理工大学高浓度难降解有机废水处理技术国家工程实验室, 上海 200237)

[摘要] 在环境保护压力和国家政策的双重推动下, 太阳能光伏技术作为一种低碳排放和低碳足迹的方法成为了当前研究的热点, 污水处理厂因其独特的空间分布和处理流程很适合嵌入光伏技术。介绍了国内外的光伏-污水厂应用现状和实例, 其中国外的光伏-污水厂技术相对成熟并逐步实现了电力自给自足, 而国内的光伏-污水厂自 2011 年在政策鼓励下开始发展, 目前发电量和强度结构等问题仍待进一步研究; 总结了光伏和水务结合过程中的具体关键技术, 如非晶柔性薄膜电池组件、钢结构支架、柔性支架、储能技术, 以及“光伏+水务”的智能化管理技术; 最后介绍了国家在光伏技术与污水处理领域所推进的相关激励政策。光伏-污水厂具有显著的能源替代优势, 虽然存在一些供电不稳定和运作上的问题, 但在政策激励和技术创新的推动下仍能在当前获得较大的收益。

[关键词] 太阳能光伏; 污水处理; 低碳水务; 智慧储能

[中图分类号] X52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0040-11

Application status of photovoltaic technology and “photovoltaic + water” in wastewater treatment plant

QIAN Yuanyuan^{1,2}, WANG Yongjie^{1,3}, YANG Xuejing^{1,3}

(1. Shanghai Engineering Laboratory of Lean Operational Technologies for Industrial Water System, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Mcwong Environmental Technology Company Limited, Shanghai 200135, China; 3. National Engineering Laboratory of High Concentration and Refractory Organic Wastewater Treatment Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Under the dual promotion of environmental protection pressure and national policy, solar photovoltaic (PV) technology as a low carbon emission and low carbon footprint method has become a hot spot for current research. Wastewater treatment plants are well suited to embed photovoltaic technology due to their unique spatial distribution and treatment processes. The current situation and examples of PV-wastewater plant applications at home and abroad were introduced, among which the technology was relatively mature and gradually achieved self-sufficiency in electricity of foreign PV-wastewater plants. While domestic PV-wastewater plants began to develop slowly from 2011 under the policy encouragement, and the current power generation, intensity structure and other issues still needed further research. The specific key technologies in the process of combining PV and water were introduced, such as amorphous flexible thin film cell modules, steel structure support, flexible support, energy storage technology, as well as the “PV + water” intelligent management technology. Finally, the national policy incentives in the field of photovoltaic technology and wastewater treatment were introduced. PV-wastewater plants had significant energy substitution advantages, although there were some unstable power supply and operational problems, they could still obtain large profits at present under the policy incentives and technological innovation.

Key words: solar photovoltaic; wastewater treatment; low carbon affair; smart energy storage

[基金项目] 科技部重点研发计划(2019YFA0705800); 国家自然科学基金项目(21876049); 上海市上海工程技术研究中心项目(20DZ2250600)

如今,在国家相关政策的推动下,光伏产业中的分布式光伏发电得到了很好的发展,且在城镇化的进程中,分布式光伏发电可应用于多种领域,如可在农村、牧区、山区,以及发展中的大、中、小城市或商业区附近建造^[1]。

2017年世界范围内的污水处理厂能耗占社会总能耗的1%~3%^[2];我国污水处理厂2014年的用电量占全社会用电量的0.26%^[3],2020年用电量为 1.84×10^{10} kW·h,仍占比0.24%^[4-5],可见污水处理厂是能耗极大的公共设施。相对美国污水处理厂耗电量 $0.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 来说,我国污水处理厂的耗电量高达 $0.29 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;并且我国污水处理厂的能耗主要是电耗,电费约占污水处理成本的50%~70%^[6],因而我国在污水处理能耗成本上还与发达国家有一定差距^[7]。此外,国家对污水的处理深度和出水水质有了更高的要求,这也使得污水处理厂降低能耗、节约成本的需求日益突出。除了能耗问题,环境问题也是不可忽视的,据美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)统计数据,全球污水行业2015年排放的 CH_4 和 N_2O 共造成了 6.3×10^8 t碳排放量,预计2030年将超过 7×10^8 t,约占总 CO_2 排放量的4.5%^[8]。因此,在降低能耗和保护环境的需求下,如何将光伏发电这种新能源技术应用于污水处理厂成为了近期污水处理的焦点话题。

“光伏+水务”可带来极高的效益。由于污水处理厂空间分布的优势,“光伏+水务”的成功融合能够极好地实现企业降本增效和拓展发展空间,不仅节约了能耗成本,还可以对环境做出有利贡献,促进碳中和目标的实现。不仅如此,“光伏+水务”还可为光伏产业拓展发展空间、实现转型升级积累经验,有助于推动经济社会的可持续发展。

1 国外光伏-污水厂技术沿革及现状

国外的光伏-污水处理厂可以追溯到上世纪80年代,美国西部Milton市建成了世界上第一座太阳能污水处理厂,该污水处理厂现已用于800个家庭的生活污水和2所工厂的生产污水处理。因为使用了新型能源技术,又大大减少了劳动力,这种污水处理系统受到了全世界的关注。

美国污水处理所消耗的电力不容小觑,占美国总发电量的3%~4%,而在一些地区这一比例甚至达到20%~40%^[9]。近十几年来,作为美国最大的供水

和废水处理公司之一,华盛顿郊区卫生委员会(WSSC)一直在积极倡导在市政水务行业嵌入可持续能源,在2010年建立了2个独立的2 MW的太阳能光伏电站,并与Standard Solar(SSI)和Washington Gas Energy Systems, Inc.(WGES)合作,在位于马里兰州的Western Branch工厂和Seneca工厂开发了5 MW的太阳能光伏发电供能系统,该系统不仅安装了新的继电器防止电力回输到电网,而且采用了多种互连模式以保证符合当地的环境法规。该太阳能光伏系统可提供运营这2家工厂所需电力的12%~21%^[10]。

加利福尼亚州的West Basin市政水务公司在2006年对其水循环设施的供能系统进行了升级改造,即安装光伏太阳能电力系统,以获得使用太阳能的长期经济和环境效益。Sun Power公司协助West Basin公司完成了光伏电池阵列的安装^[11],系统安装在地下混凝土处理储罐的顶部,外观如图1所示。该太阳能光伏发电系统可产生约 7.83×10^5 kW·h/a的清洁可再生电力,同时降低约10%的电耗成本,并预测将在13 a内达成收益^[12]。



图1 West Basin 太阳能电力系统

Fig. 1 Solar power system of West Basin

加州福尼亚州的Hill Canyon污水厂(HCTP)长期以来以其精益的环境管理闻名于世,其污水处理设有三级处理装置,目前现场60%的耗电由一部500 kW的热电联产机和功率1 MW的太阳能光伏系统提供,该光伏系统于2007年初安装[图2(a)],可抵消当前15%的电网购买电量^[13]。Rancho California水务区(RCWD)的Santa Rosa再生水厂在2009年安装了功率1.1 MW的光伏系统,该系统取得了诸多积极的环境与经济效益,清洁能源占其总能耗的30%,可节省15.2万美元/a的成本。Ventura市的Moorpark再生水厂在2010年与

AECOM 和 REC Solar 合作,于 2011 年 7 月建成了功率可达 1.13 MW 的光伏太阳能系统,该太阳能光伏系统于 2012 年 11 月投入使用,并获得并行运行许可,目前能产生约 $2.234 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的电力,大约能满足水处理设施 75% 的能源需求[图 2(b)]^[14-15]。

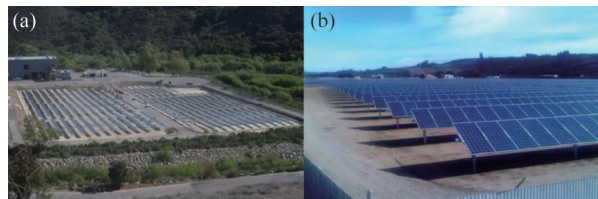


图 2 Hill Canyon 污水厂(a)和 Moorpark 再生水厂(b)太阳能光伏系统

Fig. 2 Solar photovoltaic system of Hill Canyon wastewater plant(a) and Moorpark reclaimed water plant(b)

在新泽西州, Camden 市政公用事业管理局(CCMUA)于 2012 年 7 月在 Camden 污水处理厂建设了一个 1.8 MW 的太阳能光伏发电系统,该系统由 7 200 多块太阳能电池板组成,覆盖 $28\,328 \text{ m}^2$ 的开放池。设计的创新之处在于 2.43~2.74 m 高的顶棚系统的安装不会干扰其他设备池的使用,并且克服了该废水处理厂缺乏土地和屋顶的缺陷,有利于操作或维护。据估计,该太阳能光伏系统可产生大约 $2.20 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的电力,做到自给自足后还可为附近 400 多户家庭提供电力^[15-16]。

欧洲国家大约有 19 074 个污水处理厂,约从电网消耗 $2.474 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的电力,而且这些污水处理厂向大气排放了约 $2.47 \times 10^7 \text{ t}$ 的 CO_2 。因此,欧洲各国实现光伏发电驱动污水厂运行的潜力还很大,预计最高可降低 22%~54% 的电网电耗^[17]。

国外的光伏-污水处理厂从上世纪 80 年代开始发展,历史较久。从近十几年的发展情况看,美国接入光伏发电系统的污水处理厂从开始时只为厂内贡献 20% 左右的电力到之后做到自给自足,太阳能光伏系统在污水厂供应的电量不断增加,在建设规模只有 1~2 MW 的情况下,基本可产生 $10^5 \sim 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的电力。

2 国内光伏-污水厂的应用现状

在我国,污水处理厂是高耗能产业之一,能耗费用占运营维护成本的 30%~75%,能耗大、运行费用高的缺点一定程度上阻碍了污水处理厂的建设^[18]。根据 2021 年住房和城乡建设部公布的数据,全国城市已累计建设了近 4 140 座污水处理厂^[19]。我国污水

厂数量较多,能够接入光伏系统的机会也就越大,所以在碳中和的大趋势下,光伏技术在污水厂中的发展潜力巨大^[20]。

在国家政策的激励下,2011 年年底,中冶恩菲在北京良乡卫星城污水处理厂完成了我国首个污水处理厂光伏建筑一体化项目,该污水处理厂处理水量为 4 万 t/d ,光伏系统装机容量峰瓦值达到 0.674 MW,平均发电量为 $8.085 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ [图 3(a)]^[21]。2016 年 2 月台州市顺利建成光伏电站并正式并网发电,成为全国首个污水处理厂光伏电站,该光伏电站充分利用污水处理厂的屋顶、沉淀池、生化池和接触池等结构,总装机容量为 7 MW 的分布式光伏项目分两期建设,其中一期(4.39 MW)可以满足公司 20% 左右的用电量,二期装机容量 2.61 MW[图 3(b)]^[22]。

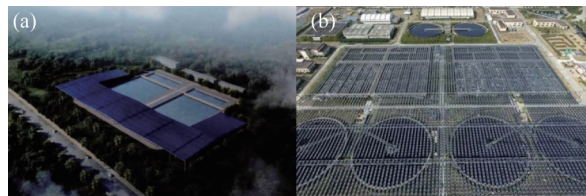


图 3 北京良乡卫星城污水处理厂光伏系统(a)和台州污水处理厂光伏系统(b)

Fig. 3 Photovoltaic system of Beijing Liangxiang satellite city wastewater treatment plant(a) and Taizhou wastewater treatment plant(b)

扬州洁源排水公司在汤汪污水处理厂、六圩污水处理厂和扬州自来水公司第一水厂建设光伏项目,3 个厂区作为光伏电站子系统共铺设了 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 光伏板,总装机容量为 9.7 MW,其中汤汪污水处理厂 3.28 MW、六圩污水处理厂 5.935 MW、自来水公司第一水厂 0.485 MW^[23]。天津滨海新区北塘污水处理厂光伏电站利用清水池、初沉池和生物池顶部空闲地带建设光伏发电设施,光伏组件安置在厂区现有构筑物的空闲顶板上,平均发电量约 $8.57 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 。济南的梅兰德水厂光伏发电项目是山东省首个柔性超大跨距式光伏支架电站示范工程,装机容量为 300 kW,发电量为 $3.7 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$,预计在 25 a 的运营期内总发电量约 $8.07 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$;项目建成后,每年可减排 369.54 t 的 CO_2 ,寿命周期内节约标准煤约 3 260 t,生态效益和环境效益显著。

目前,全国单体规模最大的污水处理厂光伏项目当属由合肥金太阳能源科技股份有限公司投资建设的王小郢污水处理厂。该污水处理厂占用空间面

积约 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^2$,总容量为 10.8 MW 的分布式光伏发电工程在 2018 年正式并网发电,并网电压等级为 10 kV,项目分 2 个并网点接至厂区内 10 kV 配电室,可提供约 $1.2 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的绿色清洁电能,相当于每年节约标准煤 3 936 t、减排 CO_2 11 965 t、降低碳粉尘 3 264 t^[24]。该项目所发电能采用“自发自用、余电上网”模式,90% 以上的电能可被污水处理厂就地消纳。王小郢污水处理厂因享受电价优惠政策,每年可节省电费支出 70 万元以上。该项目通过在污水处理厂氧化沟和沉淀池上方空间布排光伏组件,不仅实现了空间资源的综合有效利用,而且光伏板对污水池的遮挡一定程度上抑制了池内藻类的繁殖,增大了处理工艺的优化空间^[25]。该项目还对氧化沟和沉淀池进行了有效封闭,污水厂环境焕然一新,其厂区面貌如图 4 所示^[26]。



图 4 王小郢污水处理厂

Fig. 4 Wang Xiaoying wastewater treatment plant

河南郑州的马头岗污水处理厂自主研发的“光伏+水务”新模式已成为全亚洲“全流程智能自动控制+光伏能源回用”的典型代表。通过科学调控与精细化管理,该污水厂处理水量达到 84 万 t/d,超高容量太阳能光伏发电板总容量高达 17 MW,可发电约 $1.9 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$,满足了该污水处理厂全年近四分之一的用电量,节能减排效果明显^[27]。

虽然我国的光伏-污水厂建设起步较晚,但在发电量和建设规模上发展很快,发电量从 2011 年最初的 $8.085 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 发展到后来的 $10^7 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 的水平,建设总容量也发展到 17 MW。然而,我国规模较大的光伏污水厂基本都位于东部沿海省份,西部的大型污水厂正处于发展阶段。西部高原上充沛的太阳能与“光伏+污水厂”的理念较为契合,将会有更大的推广价值,但污水处理有待进一步开发^[28]。除此之外,分布在东部沿海对光伏系统抵御

极端天气的能力有着一定的考验,近几年有研究对强台风情形下的光伏设施进行了强度设计和评估^[29-30],发现在对光伏板结构体型系数、构造措施等方面进行优化设计后,光伏设施受损程度有所降低。但鉴于 2015 年广东的光伏设施遭到台风破坏^[31],光伏系统结构强度的设计方法仍需进一步研究。

3 污水处理厂光伏嵌入的关键技术与创新

除了在大型合流式市政污水处理厂中的应用,光伏系统还可以与农村分散式小型污水处理设施、新型地理式污水处理厂结合,相关工程也已投入建设。与此同时,在分布更广的涉水用能情景,如河道修复、近海渔牧、园林和梯田补水等,光伏与水务还有着更广阔的协同空间。下面将对光伏和水务结合过程的具体关键技术和技术创新进行总结。

3.1 非晶柔性薄膜电池组件

作为太阳能光伏系统中将光能转换为电能的关键性组件,太阳能电池一直是近些年研究的热点。非晶硅太阳能电池是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种新型薄膜太阳能电池^[32],虽然其光电转换效率还是低于多晶硅材料,但其成本较低且适用于大面积连续生产,很契合污水处理厂的特点。非晶硅可以在不锈钢或者塑料衬底上制备极其轻薄的太阳能电池的特点使其很适合与墙面结合;为了更好地实现光伏与建筑物的一体化,研究者们改进了非晶薄膜电池,将衬底换为柔性材料,柔性的薄膜电池组件可以直接黏附于建筑物的屋面金属板或者防水卷材等,而不需要额外安装支架系统。董磊^[33]发现柔性太阳能电池组件的质量相较于晶体硅产品轻很多,柔性屋顶光伏系统的全部设备包括组件、汇流箱、线槽、线缆等,总质量仅为 4.9 kg/m^2 ,而晶体硅屋顶光伏系统的全部设备总质量达 25 kg/m^2 。

柔性薄膜电池组件在实际应用中可以和一些悬索结构相结合。言穆昀^[34]介绍了北京市郊某污水处理厂并网光伏发电系统的设计,该处理厂综合生化池处理系统中的澄清池上方采用索膜结构铺设了非晶柔性薄膜电池组件作为顶棚材料,形成了一种跨度很大的空间结构,改善了污水处理能力,并更好地实现了光伏发电。

3.2 钢结构支架

支架支撑结构及其材料在光伏建筑一体化中具

有重要地位,其设计很大程度上决定了污水处理厂中的光伏占地。多晶硅组件实施的难点主要是支架以及支架地基的设计,原因主要是多晶硅组件的结构形式不能影响到正常的污水处理以及尽量减少占地面积。为了防止防水系统被破坏,大多数污水厂采用在屋顶混凝土块配重和预埋件的方法,但是太阳能电站大多又采用地锚法和直埋法^[35]来保证电站的可靠性和稳定性。一些常见的与多晶硅组件结合的钢结构有倾斜方阵式、幕墙框式、外挂式和平卧式钢结构等^[36],其中较为普遍和简易的是倾斜方阵式钢结构支架,但是这种结构迎风面较大、承受载荷大、容易毁坏,而且安装时很容易破坏屋顶的防水系统。2017年华电水务提出的避震抗沉光伏阵列基础^[37]采用若干个螺旋钢桩将光伏支架固定,这种结构既可保证光伏组件不会破坏原有市政水厂的管线及建筑结构,且抗震、抗风性能良好。可靠的钢结构支撑可以为处理厂省下较多的后期维修费用,但这种结构只可用于地面,而难以与建筑屋顶结合。因此,仍需开发新型的与太阳能多晶硅组件连接的钢结构支架形式,并辅以更合适的支架地基设计。

支架设计还需考虑污水处理特殊环境下的防腐效果。污水中含有多种物质,对支撑分布式光伏的钢铁支架的腐蚀性大大增加,所以分布式光伏使用的支架不仅仅是抗风化、耐腐蚀的不锈钢支架,还需要特制合适的支架^[38]。2017年华电水务公开了一种使用热浸镀锌的薄壁型钢作为光伏阵列的支架^[39],钢的保护层添加了阻锈剂,可提高支架的使用寿命。为实现耐蚀,还可从材料方面入手,牛子煜等^[40]提出了一种耐候钢,其耐大气腐蚀能力为普通碳素钢的2~8倍,工程应用时大大减少了后期维护的费用,相比传统镀锌钢支架综合单价节省了50~1 000元/t,具有强度和经济的双重收益。

3.3 柔性支架

太阳能光伏柔性支架是为了在横向悬挂或斜拉的钢索上安装光伏板,钢索两端由刚性支撑连接,柔性支架可以与多晶硅组件或非晶柔性薄膜太阳能组件相结合。光伏柔性支架由柔性系统和支架系统组成,其中柔性系统由预应力悬索、稳定索、组件固定夹具、光伏组件等构成;支架系统由基础(包括独立基础、桩基础)、钢立柱、钢梁、支撑体系(包括斜拉索、斜支撑)等构成^[41]。这种柔性支架结构可以跨越复杂的地形,在污水处理厂中可以有效解决支架

的占地问题且有着很好的强度。

许多研究针对柔性支架提出了一些改进。2018年江苏印加新能源公开了一种柔性光伏支架^[42],该支架采用跨度很大的结构对光伏组件设置固定装置,且支撑柱可转动以减少受风时产生的应力,2根立柱之间设置若干根拉线,实现了轻量化和跨度大的目标。2018年东南大学的朱明亮团队分别对柔性支架中的稳定索进行了改进,提出了3种固定方式,分别为索桁式^[43]、斜拉式^[44]、悬吊式^[45]。索桁式和斜拉式柔性光伏支架单元竖向刚度较高,避免了光伏组件在风荷载作用下的振动,可用于大跨度的情形,而且由于构件采用装配化,结构整体质量较轻,便于储存和运输,并能够实现多次反复拆装使用。悬吊式柔性支架的稳定索既设有横向又设有竖向,通过竖向索的调节,可以实现对光照角度的实时跟踪,提高发电效率,并且可与其他临时结构相结合以实现多种功能。在实际应用中,2019年沧州市运东污水处理厂在其氧化沟和厌氧池上方安装了柔性光伏支架结构,其支撑结构为螺旋式钢桩,并在上方拉有钢缆形成的框架网以铺设光伏组件,有效解决了光伏设施的占地问题。

柔性支架的使用很好地解决了光伏组件对大面积占地的需求,而且可以有效跨越复杂地形,但是其安装和维修的问题还有待解决。

3.4 接入方案与设计

分布式光伏发电有2种形式,分别为上网以及离网,离网为自发自用,上网则是接入电网,也称并网。分布式并网型太阳能光伏发电系统的工作原理是利用光伏组件半导体材料的“光电”效应,由光伏组件将太阳的辐射能转换成直流电能,可通过控制器将直流电能直接供给用户直流负载,也可将直流电经并网逆变器输出交流电供给本地交流负载,多余的交流电能输送给电网^[46]。分布式光伏发电应遵循“因地制宜、清洁高效、分散布局、就近利用”的原则,并充分利用当地太阳能资源替代和减少化石能源消费,所以需要开发更新型的并网技术,以保证电路的稳定和有效分配。

典型的分布式光伏发电项目的消纳模式为“自发自用、余量上网、电网调节”,这种方式不仅能充分利用清洁能源实现自给自足,还可以得到政策补贴以弥补光伏系统的安装费用,带来一定的经济效益。但是分布式光伏发电接入电网需要一定的规范

标准且需要一些创新的方式。分布式光伏发电和并网过程中,光伏发电系统依照接入点数量可分成2种,分别为单点接入系统和多点接入系统;依照接入点电压等级可分成2大类,10 kV及以上为高压接入系统,三相380 V及单相220 V为低压接入系统^[47]。根据国家电网公司的有关规范要求,光伏发电系统需要采用10 kV电压等级接入企业配电网并设置不低于2个并网点,以满足单个并网点光伏装机容量不高于6 MW的要求^[48]。2015年海天水务公布的一项专利^[49]中设计了一种用于工业污水处理的光伏装置,主要包括控制电路、直流输出端、交流输出端、逆变器;太阳能电池阵列板设有光电感应器,可以根据环境的光照强度自动调整,以保证发电的稳定;而控制电路可将转化后的电能通过直流输出端直接用于设备使用,也可以通过逆变器输出交流电以接入电网,这种能够自动调整的电路更适合光伏发电接入电网。王少波等^[50-51]介绍了光伏发电在污水处理厂中的实际应用,接入方式都创新地采用了监控测量系统对系统进行实时监控,并实时调整以便更协调地接入电网。

因为光伏发电的特殊性,接入电网的方案需要进一步设计创新才能使运行效果最佳化。

3.5 储能技术

光伏能源的嵌入需要考虑到日照波动与季节变化的影响以及污水厂的连续工作性,单纯的光伏发电接入容易造成供配电系统的不稳定,因此储能系统的建设也相当重要。在光伏板接入污水厂后首先需要储能设备将发出的电能充入储能电池,由储能系统为污水厂供电。无储能设备和有储能设备的光伏-污水系统见图5。

单纯的没有配备储能设备的光伏发电系统存在两个方面的缺陷:一是受气象、季节、光照强度的变化影响,光伏发电的出力不稳定;二是污水厂的工作性质使其难以在夜晚做到光伏发电来支撑处理工艺的能耗,所以这种形式的光伏-污水厂增加了污水厂配电系统的管理难度,且节能较少。接入储能设备的光伏-污水系统采用新兴的锂电池储能系统^[52],储能系统由锂电池、储能变流器(PCS)、电池管理系统(BMS)以及监控主机等组成,光伏发电产生的电能通过PCS总线储存在蓄电池中,并通过监控主机和BMS调控,这样可减少电力波动对供电系统的冲击,从而提高供电系统的可靠性,并减少系统损耗。

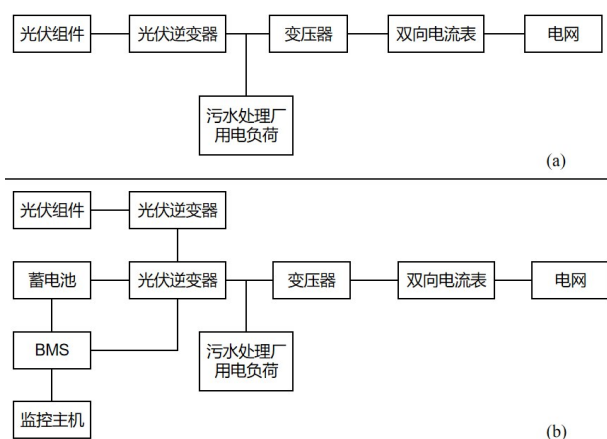


图5 无储能设备(a)和有储能设备(b)的光伏-污水系统

Fig. 5 Photovoltaic sewage system without energy storage equipment (a) and with energy storage equipment (b)

储能系统需要有一定的灵活性,以便将光伏发电系统产生的电能存储,并在用电负荷高峰时释放。保证电网系统有效运转,区域的用电需求才能真正得到有效满足^[53]。储能系统可以引入智能系统或开发智能控制手段,根据污水厂内的用电情况进行供配电的调节。2017年孙振宇等^[54]建立数学模型对光照和气候变化条件下的光伏发电量进行了模拟计算,该模型包括逆变器等接入方案中的关键参数,通过对春夏秋冬4个典型日进行光伏出力计算,得出全天各时段单个光伏电池的发电量并确定所需光伏电池数,并与对应时段的用电量相比较,从而确定污水处理厂分布式光伏最佳装机容量,这种数学模型预测的方法很有借鉴价值。不仅如此,很多企业采用了超级电容器加蓄电池的组合方式,还可以搭载变转器和光伏阵列等其他电子元件^[55],通过降低整体网流的谐波含量缓解功率波动的问题,并能够真正地调整并网的电流。

3.6 与风电、市电、热泵等结合的多能互补方案

在利用太阳能光伏发电的同时,风能、污水热能、生物质能等新能源也可以同时接入污水处理厂,形成一种多能互补的系统。近些年,有一些污水厂开始探索多能互补的系统方案。孙振宇等^[56]采用污水源热泵与分布式光伏发电-市电双电源协同供电,该供应系统分为污水处理、污水源热泵和分布式光伏发电3部分。采用该方案的污水厂每年共节约387.1 t标准煤,减排483.9 t CO₂以及其他大气污染物,得到了很好的环境效益和经济效益。多能互补系统流程如图6所示。

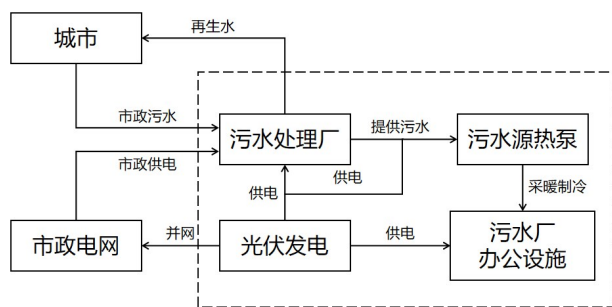


图6 多能互补综合能源利用系统

Fig. 6 Multi energy complementary comprehensive energy utilization system

李鹏宇等^[57]研究了太阳能和风能协同供电驱动污水处理的设施,该设施利用太阳能与风能的季节互补性,通过调控自动控制系统以及建立相关运行工况,实现了发电单元电能输出稳定,且能源利用率达到80%。这种互补的方案可以大大减少光伏发电的局限性,降低储能设施的成本。多元模式的发展在节约能源的同时提高了生态效应,并且实现了循环经济^[58],有很高的推广价值。

一些企业也提出了太阳能与市电、风电相结合的方案。北京博大水务接连提出了光伏电与市电协同供电的污水处理系统^[59]、双膜法再生水处理系统^[60]和SBR污水处理系统^[61],这3种多能协同的系统都包括了分布式光伏矩阵、智能控制系统、光伏储能系统、低压配电系统以及不同的水处理系统;分布式光伏矩阵上安装有环境监测系统,配合智能控制系统可以简便高效地实现白天黑夜不同运行条件下对市电和太阳能的切换和调控,最大限度地利用光伏电供电,并将处理后的污水二次利用,保证光伏发电的发电效率。2020年湖北金宝马环保提出了一种风能和太阳能互补供电的污水处理系统^[62],该系统包括供电装置、污水处理装置和水泵,太阳能光伏与风力发电机都为污水水泵供电以驱动污水进入厌氧池等处理池;通过供电互补控制器调控2种能量,弥补了阴雨天光伏发电的困难,保证了新能源接入的污水厂运行更加稳定。

除了风能、市电,更多种类新能源互补的运行方案还可以进一步开发。

3.7 融合光伏的水处理技术创新

为了充分利用太阳能光伏,一些创新性融合光伏的水处理系统和技术被提出。其中较为普遍的是光伏/光热一体化装置,该系统的基本原理是将太阳

能电池和太阳能光热装置集成一个单元,光热装置中的液体流过太阳能电池起冷却作用的同时又可以维持较高的液体温度^[63],该方法既提高了太阳能电池的发电效率,又对液体起到了加热升温的作用,更好地实现了一些需要高温水处理的工艺。C. ZAMFIRESCU等^[64]提出了一种光伏/光催化系统,该系统利用光伏作为光源进行光催化处理硫磺废水,同时电解该废水产生了氢气。M. E. ORUC等^[65]在此基础上提出了集光伏电池与电解水制氢反应器于一体的混合系统。可以发现,这些融合光伏的创新型水处理技术都与电解制氢有关,而氢气又可以替代反硝化工艺的碳源,所以该技术对于污水处理有着很重要的价值。Zhen WANG等^[66]提出了一种光伏/光催化混合水处理系统,该系统将光催化反应器与光伏电池组成一个整体,实现了光伏发电与有机染料废水处理于一体;染料废水经离心泵在电池板上循环流动,太阳光中的紫外光作为光源进行光催化降解有机废水,可见光与近红外光用于电池板的发电,循环废水吸收太阳光中的远红外光从而降低了电池温度,实现了太阳光全光谱的利用。然而,这些方法的发电量还有待提高,更有效率的创新性方案的开发还有很大的空间。此外,这些创新性的处理技术还停留于实验室阶段,在经济性上也还有一定的局限性,还需要大规模的实践才能推广。

光伏接入除了驱动具体的水处理工艺,还催生了智能控制系统的开发,即智能水务。智能水务是指采用各种在线监测设备对水厂内的水质等参数进行实时监控与调控,通过分析处理海量水务信息来辅助决策建议,以更加精细和动态的方式管理水务系统的生产、运营和服务流程,从而达到“智慧”的状态。“光伏+水务”是把光伏发电过程中各种影响因素也加以监控与调整,形成与污水处理相结合的智能系统,这一方面仍需进一步研究。

光伏技术与污水处理厂结合在生态效益方面有很高的推广价值,而在经济性方面还有一定的发展空间。因为一些技术还未发展成熟,目前主要在后期维修方面和国家政策补贴上有较好的经济效应,但经济性方面的特点仍是投资大、回收周期长。

4 光伏嵌入的激励政策

政府对于环保问题的重视日益增加,在我国碳达峰、碳中和目标宣布后,已经有发展基础的光伏产

业将得到进一步的推广,并且更好地带动“光伏+水务”的开发。我国对于光伏发电应用的激励政策自

2009年开始,表1列举了近十几年来我国光伏技术与污水处理企业结合的相关政策。

表1 光伏技术与污水处理企业相结合的政策

Table 1 Policies for the combination of photovoltaic technology and wastewater treatment enterprises

年份	政策名称	政策相关内容
2009	《财政部 科技部 国家能源局关于实施金太阳示范工程的通知》(财建[2009]397号)	启动“太阳能光电建筑应用示范项目”和“金太阳示范工程”补贴
2012	《太阳能发电科技发展“十二五”专项规划》(国科发计[2012]198号)	部署了光伏技术的重点研究方向和任务,包括关键技术与示范区建立
2013	《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》(国发[2013]24号)	明确了光伏产业上网电价及补贴的来源
2014	《国家能源局关于进一步落实分布式光伏发电有关政策的通知》(国能新能[2014]406号)	鼓励开展多种形式的分布式光伏发电应用,加强工程标准和质量管理等,还包含了对碳交易的鼓励
2018	《关于2018年光伏发电有关事项的通知》(发改能源[2018]823号)	明确了国家认可的规模管理范围的分布式光伏项目;标杆上网电价,分布式全额上网、余电上网补贴统一下降0.05元/(kW·h)
2020	《关于完善长江经济带污水处理收费机制有关政策的指导意见》(发改价格[2020]561号)	鼓励污水处理企业综合利用场地空间,采用“自发自用、余量上网”模式建设光伏发电项目
2020	《碳排放权交易管理办法(试行)》(部令 第19号)	宣布全国碳市场的第一个履约周期从2020年2月1日开始启动

从近几年的国家政策可以看出,污水处理企业中光伏技术的应用不仅可以通过“自发自用、余量上网”的形式对企业本身产生一定的收益,还可以从碳交易市场中获得收益。例如按照CCER(核证自愿减排量)市场的交易价格,一个年发电量500 MW左右的光伏电站在其全生命周期(25 a)内最多可以减排 1.3×10^5 t的CO₂,通过碳交易可额外收益0.2元/(kW·h)^[67-68]。在上海、广东等地逐步出台的碳普惠机制也将污水处理厂分布式光伏项目纳入了重点场景,相关方法学和激励机制建设正在开展中。

5 展望

光伏技术在污水处理厂的应用具有显著的能源替代优势,普遍可节电20%~30%,是污水厂节省电费和减少碳排放的有效手段。但是,目前光伏技术节能减排效益出现了瓶颈,尽管有国家政策的激励,许多分布式光伏发电项目还是因安装难度高、电费回收不稳定等问题遭遇了一定的困难。究其原因,笔者认为主要在于光伏与构筑物衔接的亲和不强、天气变化对光伏效用的影响较大、光伏发电替代传统电能的模式单一、光伏技术应用场景的潜力挖掘不够等。因此,“光伏+水务”模式的下一步开发和创新还需要从以下四方面重点突破:

(1)尽管污水处理厂占地大、布局扁平化、结合系统土地边界效应好,但其与光伏技术的结合关系实际更应看作是建筑光伏一体化的系统性问题,需要在非晶柔性薄膜电池组件、多晶组件钢结构支架、柔性支架等光伏技术主要构件上加强研究,从而达

到光伏与构筑物的充分融合,获取更大的铺设规模。

(2)光伏储能系统需要对天气变化具有更强的灵活性,即在光伏有效时间内的储能效用还需大幅提升。光伏储能系统可以引入合理模型和精准算法,根据污水厂用电情况调节供配电和计算最优电量储存量,在不同季节执行不同的光伏使用方案,从而达到光伏节能的最大化收益。此外,光伏系统的接入对极端天气的抵御能力和在全国各地的推广仍需进一步研究。

(3)在使用光伏发电的同时,风能、污水热能、生物质能等新能源也可以同时接入污水处理厂,形成多能互补的系统。通过引入智能化的用能管理系统,根据污水厂用电情况进行科学调控和匹配,实现不同发电单元切换、总体电能输出稳定、能源替代比例进一步提高的目标。

(4)融合光伏的水处理技术在污水处理厂的应用,节能减排与提质增效双管齐下,如引入光伏/光催化系统、光伏/电解制氢/零碳反硝化系统等。

展望未来,随着上述技术问题的解决和突破,光伏技术在污水处理厂的铺设规模、装机容量和融合程度将会不断扩大。结合精细化管理和智能化控制,在当今“碳达峰、碳中和”的历史任务下,“光伏+水务”模式必将焕发出更加蓬勃的生机。

参考文献

[1] 黄碧斌,李琼慧,蒋莉萍.德国分布式电源的发展经验及其启示[J].中外能源,2013,18(6):26-30.
HUANG Bibin, LI Qionghui, JIANG Liping. German experience in developing distributed power systems and lessons for China [J].

- Sino-Global Energy, 2013, 18(6):26-30.
- [2] 宋新新, 林甲, 刘杰, 等. 面向未来污水处理技术应用研究现状及工程实践[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1):39-53.
- SONG Xinxin, LIN Jia, LIU Jie, et al. The current situation and engineering practice of sewage treatment technology facing the future[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1):39-53.
- [3] 李云, 蒋进元, 白璐, 等. 污水处理厂能耗评估与优化现状[J]. 工业水处理, 2018, 38(9):1-4.
- LI Yun, JIANG Jinyuan, BAI Lu, et al. Present situation of the energy consumption evaluation and optimization in wastewater treatment plants[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(9):1-4.
- [4] 姚金楠. 国家能源局:11月全社会用电量同比增长3.1%[N]. 中国能源报, 2021-12-20(3).
- YAO Jinnan. National Energy Administration: The electricity consumption of the whole society in November increased by 3.1% year-on-year[N]. China Energy News, 2021-12-20(3).
- [5] 常纪文, 井媛媛, 耿瑜, 等. 推进市政污水处理行业低碳转型, 助力碳达峰、碳中和[J]. 中国环保产业, 2021(6):9-17.
- CHANG Jiwen, JING Yuanyuan, GENG Yu, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality[J]. China Environmental Protection Industry, 2021(6):9-17.
- [6] 房镇, 傅洪波, 丁良才. 分布式光伏发电系统在污水处理厂的应用[J]. 节能与环保, 2019(9):86-87.
- FANG Zhen, FU Hongbo, DING Liangcai. Application analysis of distributed photovoltaic power generation system in sewage treatment plant[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2019(9):86-87.
- [7] 臧小华. 污水处理厂如何降低能耗分析[J]. 节能, 2019, 38(4):101-102.
- ZANG Xiaohua. Analysis on reducing energy consumption of sewage treatment plant[J]. Energy Conservation, 2019, 38(4):101-102.
- [8] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水, 2017, 53(3):1-3.
- WANG Hongchen. Carbon emission reduction path and potential of urban sewage treatment industry in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(3):1-3.
- [9] GUDE V G. Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45:52-68.
- [10] Standard Solar. Washington Suburban Sanitary Commission, Washington Gas Energy Systems and Standard Solar unveil fields of solar panels that will power two wastewater treatment plants[EB/OL]. (2013-11-06)[2021-05-14]. <https://www.standardsolar.com/about-us/news/press-releases/4762>.
- [11] SHEILDS P. Solar power saves \$ 500 k in annual energy costs[J]. American Water Works Association Journal, 2009, 101(7):30-33.
- [12] LAZAROVA V, OELKER G, OELKER W. Production of custom-made recycled water for various reuse purposes: Lessons learned from one of the world's largest recycling facilities[J]. Water Practice and Technology, 2012, 7(3):wpt2012052.
- [13] ROGERS C, WAKINS M D. City of Thousand Oaks uses innovative power purchase agreements for renewable energy at its Hill Canyon wastewater treatment plant[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2008, 11:4529-4533.
- [14] REC Solar. REC Solar dedicates 1.1 MW solar system at Moorpark wastewater treatment plant[EB/OL]. (2013-01-25)[2021-05-14]. <https://www.businesswire.com/news/home/20130125005655/en/REC-Solar-Dedicates-1.1-MW-Solar-System-at-Moorpark-Wastewater-Treatment-Plant>.
- [15] AECOM. Technical feasibility study for photovoltaic systems DC water blue plains advanced waste water treatment plant[R]. Washington, D.C: DC Water, 2014.
- [16] NASH J, GENTEK M. Sustainable Camden County, making it greener together: The sustainable plan for Camden County, NJ[R]. New Jersey: New Jersey Environmental Digital Library, 2018.
- [17] GANORA D, HOSPIDO A, HUSEMANN J, et al. Opportunities to improve energy use in urban wastewater treatment: A European-scale analysis[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(4):044028.
- [18] XU Jin, LUO Pengzhou, LU Bowen, et al. Energy-water nexus analysis of wastewater treatment plants (WWTPs) in China based on statistical methodologies[J]. Energy Procedia, 2018, 152:259-264.
- [19] 沈耀良. 城市污水处理技术: 走向低碳绿色[J]. 苏州科技大学学报: 工程技术版, 2021, 34(3):1-16.
- SHEN Yaoliang. Municipal wastewater treatment technology: Towards low carbon and green[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering Technology Edition, 2021, 34(3):1-16.
- [20] 宫徽. 污水厂碳中和运行潜力待挖掘[N]. 中国环境报, 2016-08-02(10).
- GONG Hui. The potential of carbon-neutral operation of sewage plants remains to be tapped[N]. China Environment News, 2016-08-02(10).
- [21] 孙波, 郭大力, 刘运北. 北京良乡卫星城污水处理厂光电建筑示范[J]. 建设科技, 2012(5):66-68.
- SUN Bo, GUO Dali, LIU Yunbei. Demonstration of photoelectric construction of satellite city sewage treatment plant in Liangxiang, Beijing[J]. Construction Science and Technology, 2012(5):66-68.
- [22] 洪杰, 张恒芝. 台州市推进污水处理概念厂建设的探索与实践[J]. 城市建筑, 2016(15):387-387.
- HONG Jie, ZHANG Hengzhi. Exploration and practice of promoting the construction of sewage treatment concept plant in Taizhou[J]. Urbanism and Architecture, 2016(15):387-387.
- [23] 刘晓明, 严俊泉, 黄棚兰. 太阳能发电在水处理行业中的创新应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(18):90-94.
- LIU Xiaoming, YAN Junquan, HUANG Penglan. Innovative application of solar power generation in water treatment industry[J].

- China Water & Wastewater, 2015, 31(18): 90-94.
- [24] 央广网. 全国单体规模最大的污水厂光伏发电项目并网发电[EB/OL]. (2018-08-22)[2021-05-14]. https://www.cnr.cn/ah/news/20180822/t20180822_524339133.shtml.
- China National Radio. The largest single-scale sewage plant photovoltaic power generation project in the country is connected to the grid for power generation[EB/OL]. (2018-08-22)[2021-05-14]. https://www.cnr.cn/ah/news/20180822/t20180822_524339133.shtml.
- [25] 丁怡, 王玮, 宋新山, 等. 高效藻类塘在水质净化中的研究进展[J]. 工业水处理, 2017, 37(9): 15-20.
- DING Yi, WANG Wei, SONG Xinshan, et al. Research progress in high rate algal ponds for water purification[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(9): 15-20.
- [26] 郭如琦. 航拍下王小郭污水处理厂分布式光伏发电项目[N]. 人民日报, 2018-08-23(2).
- GUO Ruqi. Aerial photography of distributed photovoltaic power generation project of Wang Xiaoying sewage treatment plant[N]. People's Daily, 2018-08-23(2).
- [27] 吕利平, 李航, 李伟, 等. 碳中和在污水处理厂的实践途径与应用进展[J]. 工业水处理. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2021-1095.
- LÜ Liping, LI Hang, LI Wei, et al. Practice approach and application progress of carbon neutrality in wastewater treatment plant[J]. Industrial Water Treatment. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2021-1095.
- [28] 杨庆. 西部地区如何补上污水处理短板?[N]. 中国环境报, 2019-11-18(3).
- YANG Qing. How to make up for the shortcomings of sewage treatment in the western region?[N]. China Environment News, 2019-11-18(3).
- [29] HSU S T, LIN Weiyou, WU S J. Environmental factors for non-uniform dynamic mechanical load test due to wind actions on photovoltaic modules[J]. Energy Procedia, 2018, 150: 50-57.
- [30] 史磊. 光伏电站支架系统结构抗台风设计实践[J]. 南方能源建设, 2020, 7(1): 90-94.
- SHI Lei. Design and practice of typhoon resistance for supporting bracket system of PV power station[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1): 90-94.
- [31] 韦媛. “彩虹”台风灾害对太阳能光伏电站损毁性影响原因分析和应对措施[J]. 通讯世界, 2015(22): 103-105.
- WEI Yuan. Analysis of the causes and countermeasures of Mujigae typhoon disaster on the damage of solar photovoltaic power stations[J]. Telecom World, 2015(22): 103-105.
- [32] 成志秀, 王晓丽. 太阳能光伏电池综述[J]. 信息记录材料, 2007, 8(2): 41-47.
- CHENG Zhixiu, WANG Xiaoli. The expatiates of the solar energy photovoltaic cell[J]. Information Recording Materials, 2007, 8(2): 41-47.
- [33] 董磊. 柔性非晶硅薄膜太阳能电池组件与光伏建筑一体化[J]. 中国建筑防水, 2010(22): 43-46.
- DONG Lei. Flexible amorphous silicon thin film PV components and BIPV[J]. China Building Waterproofing, 2010(22): 43-46.
- [34] 言穆昀. 并网光伏发电系统在污水处理厂中的应用[J]. 现代建筑电气, 2015, 6(4): 24-27.
- YAN Muyun. Application of grid-connected photovoltaic generation system in sewage treatment factory[J]. Modern Architecture Electric, 2015, 6(4): 24-27.
- [35] 朱俊江. 我国太阳能光伏支架安装存在的问题及解决方法[J]. 中国高新技术企业, 2015(22): 91-93.
- ZHU Junjiang. Problems and solutions of solar photovoltaic bracket installation in China[J]. China High-Tech Enterprises, 2015(22): 91-93.
- [36] 吴成万. 光伏钢结构集成体系研究及嵌入模块式光伏组件研发与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WU Chengwan. Research of photovoltaic steel structure integrated system and embedded modular PV module's research & design and application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [37] 王正平, 陈北洋, 王建华, 等. 一种避震抗沉光伏阵列基础: CN206800437U[P]. 2017-12-26.
- [38] 杨晓强. 污水处理厂分布式光伏的构建及优化研究[J]. 住宅与房地产, 2019(22): 235.
- YANG Xiaoqiang. Study on construction and optimization of distributed photovoltaic in sewage treatment plant[J]. Housing and Real Estate, 2019(22): 235.
- [39] 潘旗, 陈北洋, 张博丰, 等. 一种污水处理厂分布式光伏系统: CN107046395A[P]. 2017-08-15.
- [40] 牛子煜, 段文超, 徐翔. 耐候钢在光伏支架中的应用[J]. 西北水电, 2020(S2): 101-102.
- NIU Ziyu, DUAN Wenchao, XU Xiang. Application of weathering steel in PV supporting brackets[J]. Northwest Hydropower, 2020(S2): 101-102.
- [41] 刘兴佳, 崔国桥, 于恺, 等. 太阳能光伏柔性支架体系研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(2): 79-81.
- LIU Xingjia, CUI Guoqiao, YU Kai, et al. Study on solar photovoltaic flexible support system[J]. New Technology & New Products of China, 2020(2): 79-81.
- [42] 武书龙, 涂云霞, 王远浩, 等. 柔性光伏支架及光伏支架系统: CN207442743U[P]. 2018-06-01.
- [43] 朱明亮, 郭正兴. 一种索桁式柔性光伏支架单元及光伏支架: CN208046507U[P]. 2018-08-03.
- [44] 朱明亮, 郭正兴. 一种斜拉式柔性光伏支架单元及光伏支架: CN108400750A[P]. 2018-10-19.
- [45] 朱明亮, 郭正兴. 一种悬吊式柔性光伏支架单元及光伏支架: CN208001245U[P]. 2018-08-03.
- [46] 符亚杰. 分布式光伏发电系统的原理及其应用前景[J]. 科技与企业, 2015(20): 92.
- FU Yajie. Principle and application prospect of distributed photovoltaic power generation system[J]. Science-Technology Enterprise, 2015(20): 92.
- [47] 张华. 50 MW 分布式光伏电站和接入电网系统设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- ZHANG Hua. Design of 50 MW distributed photovoltaic power sta-

- tion and access grid system [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [48] 国家电网公司. 分布式电源接入系统典型设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 61.
- State Grid Corporation of China. Typical design of distributed power access system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 61.
- [49] 彭玉梅, 潘志成, 杨开虎, 等. 一种应用于工业污水处理的光伏发电装置: CN204886808U [P]. 2015-12-16.
- [50] 王少波, 卿湘运. 光伏发电系统在污水处理厂中的实施研究[J]. 能源环境保护, 2016, 30(2): 1-5.
- WANG Shaobo, QING Xiangyun. Application of photovoltaic generation systems for sewage treatment plants [J]. Energy Environmental Protection, 2016, 30(2): 1-5.
- [51] 张开海. 分布式光伏发电系统在某污水处理厂中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 81-84.
- ZHANG Kaihai. Application of distributed photovoltaic power generation system in a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 81-84.
- [52] 姜放. 光伏储能技术应用于污水处理厂的分析[J]. 工程建设与设计, 2020(3): 141-143.
- JIANG Fang. Application analysis of photovoltaic energy storage technology in sewage treatment plant [J]. Construction & Design for Engineering, 2020(3): 141-143.
- [53] 高思俨. 储能技术在光伏并网系统中的应用研究[J]. 通讯世界, 2019, 26(5): 188-189.
- GAO Siyan. Research on application of energy storage technology in photovoltaic grid-connected system [J]. Telecom World, 2019, 26(5): 188-189.
- [54] 孙振宇, 沈明忠. 污水处理厂分布式光伏的构建及优化[J]. 新能源进展, 2017, 5(2): 151-156.
- SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong. Constructing and optimizing distributed photovoltaic in sewage treatment plant [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2017, 5(2): 151-156.
- [55] 杨润广. 储能技术在光伏发电系统中的应用[J]. 科技创新与应用, 2021(10): 188-190.
- YANG Runguang. Application of energy storage technology in photovoltaic power generation system [J]. Technology Innovation and Application, 2021(10): 188-190.
- [56] 孙振宇, 沈明忠, 陈北洋, 等. 污水处理厂多能互补的综合能源供应系统构建及经济性分析[J]. 华电技术, 2016, 38(10): 73-76.
- SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong, CHEN Beiyang, et al. Construction of multi-energy complementary integrated energy supply system for sewage treatment plant and its economic analysis [J]. Huadian Technology, 2016, 38(10): 73-76.
- [57] 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.
- LI Pengyu, LIU Junxin, ZHENG Tianlong, et al. Feasibility of bio-reactor driven by non-lead-acid battery wind-solar energy system for rural sewage treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(9): 2429-2436.
- [58] 潘子欣. 污水处理综合利用项目能值分析兼论滨海地区模式[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- PAN Zixin. Energy analysis of comprehensive utilization project of wastewater treatment: Concurrently on coastal area model [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [59] 崔勇, 石晔, 罗辉甲, 等. 光伏电与市电协同供电的污水处理系统及供电方法: CN107311310B [P]. 2020-08-11.
- [60] 崔勇, 石晔, 罗辉甲, 等. 光伏电与市电供电的双膜法再生水处理系统及供电方法: CN107370229A [P]. 2017-11-21.
- [61] 崔勇, 石晔, 周贺, 等. 分布式光伏发电与市电协同供电的SBR污水处理系统: CN207251222U [P]. 2018-04-17.
- [62] 吴水清, 吴坤若. 一种风能太阳能互补供电的污水处理系统: CN210945014U [P]. 2020-07-07.
- [63] VIVAR M, EVERETT V, FUENTES M, et al. Initial field performance of a hybrid CPV-T microconcentrator system [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(8): 1659-1671.
- [64] ZAMFIRESCU C, DINCER I. Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production [J]. Solar Energy, 2014, 107: 700-713.
- [65] ORUC M E, DESAI A V, KENIS P J A, et al. Comprehensive energy analysis of a photovoltaic thermal water electrolyzer [J]. Applied Energy, 2016, 164: 294-302.
- [66] WANG Zhen, WANG Yiping, VIVAR M, et al. Photovoltaic and photocatalytic performance study of SOLWAT system for the degradation of methylene blue, acid red 26 and 4-Chlorophenol [J]. Applied Energy, 2014, 120: 1-10.
- [67] 刘林坤. 光伏发电项目自愿减排量方法学研究[D]. 湖北: 湖北工业大学, 2018.
- LIU Linkun. Research on methodology of voluntary emission reductions for photovoltaic power generation projects [D]. Hubei: Hubei University of Technology, 2018.
- [68] 陈婉. CCER市场有望重启[J]. 环境经济, 2022(2): 30-37.
- CHEN Wan. CCER market expected to restart [J]. Environmental Economy, 2022(2): 30-37.
- 【作者简介】 钱媛媛 (1988—), 博士。E-mail: qianyuanyuan@mc-wongtech.com。通讯作者: 杨雪晶, 研究员。电话: 021-64251894, E-mail: xj.yang@ecust.edu.cn。
- 【收稿日期】 2022-04-17 (修改稿)