

# 光伏电站对采煤沉陷塘水环境的影响研究进展

刘新

淮南市土地整理中心, 安徽 淮南 232007

DOI: 10.61369/SSSD.2026040024

**摘 要 :** 近年来, 光伏电站被广泛用到许多水域, 成为水体资源化利用的重要手段。然而, 光伏电站存在漂浮式和立柱式两种类型, 它们被安装在不同深度水体中。目前, 光伏对水体生态环境的研究不多。由此, 本研究从不同类型光伏对水体气象因子影响、水体环境质量影响和水体浮游植物生态影响角度, 梳理了当下研究进展, 以期对光伏对水体影响研究提供理论和数据参考。

**关 键 词 :** 光伏; 采煤沉陷塘; 水环境

## Research Progress on the Impact of Photovoltaic Power Stations on the Water Environment of Coal Mining Subsidence Ponds

Liu Xin

Huainan Land Consolidation Center, Huainan, Anhui 232007

**Abstract :** In recent years, photovoltaic power stations have been widely used in many water areas, becoming an important means of water resource utilization. However, there are two types of photovoltaic power stations: floating and columnar photovoltaic type, which are installed in water bodies of different depths. Currently, there is a lack of research on the impact of photovoltaic power stations on water body ecological environments. Therefore, this study reviews the current research progress from the perspectives of the influence of different types of photovoltaic power stations on water body meteorological factors, water body environmental quality, and water body phytoplankton ecology, with the aim of providing theoretical and data references for the research on the impact of photovoltaic power stations on water bodies.

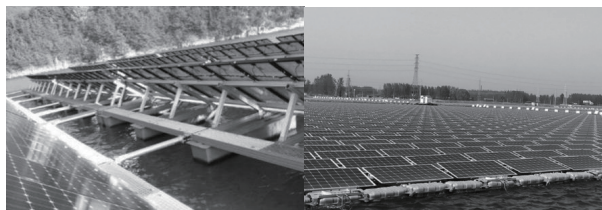
**Keywords :** photovoltaic; coal mining subsidence ponds; water environment

水面光伏发电系统是一类依托水塘、小型湖泊、水库、堰塞湖等天然或人工水域空间建设的光伏发电设施, 其核心特征在于将光伏阵列搭载于水面漂浮载体之上, 突破了陆地光伏电站对土地资源的依赖限制。该技术的研发与工程化应用在国际上起步较早, 日本、印度、韩国、新加坡、英国、美国、挪威、巴西、澳大利亚等国家均已完成多座水上光伏电站的规划、建设与投运工作, 积累了丰富的实践经验。相较之下, 我国水面光伏发电领域的规模化发展进程启动于2016年, 虽发展时间较短, 但依托广阔的水域资源与光伏产业优势, 近年来呈现出快速增长的态势。与传统陆地光伏发电系统相比, 水面光伏电站具备两项突出的性能优势: 其一, 漂浮载体可灵活调整光伏组件的安装方位与倾角, 能够最大化捕捉太阳辐射能, 使组件倾斜面接收的辐射量显著高于陆地光伏系统; 其二, 开阔的水域空间具备良好的通风条件, 加之水体蒸发的自然冷却效应, 可有效抑制光伏组件运行过程中的表面温升问题, 进而使发电效率较陆地光伏系统提升10%~15%。目前, 水面光伏用于多种水域环境, 如: 河北省临西县水库、印尼西爪哇省齐腊达水库、台湾农工业用蓄水池和湖泊、荷兰特丹港口浅水人造湖、美国索诺玛县灌溉池塘。近年来, 光伏发电技术的应用场景进一步拓展, 采煤沉陷区形成的塌陷塘已成为该技术落地的重要载体。早在2016年, 安徽省淮南市便率先在采煤沉陷区建成一座装机容量为20 MW的渔光互补光伏电站, 开启了沉陷区水域光伏开发的实践探索; 2017年6月, 该市谢家集区施家湖光伏电站完成全容量并网发电, 装机规模提升至70 MW, 标志着沉陷区光伏项目的建设技术日趋成熟; 2018年4月, 安徽省淮北市濉溪县韩村镇采煤沉陷区的100 MW水面光伏电站实现初步并网发电, 进一步扩大了该类项目的应用规模。据悉, 三峡新能源公司在安徽淮南150MW水光伏项目(全球最大水面光伏电站)全部建成后年发电量可达1.5亿度。可见, 光伏用于采煤塌陷水域可有效利用废弃沉陷水域资源, 并产生可观经济效益。

然而, 采煤沉陷区积水塌陷塘的水域环境具有显著特殊性, 其成因源于煤炭资源开采后采空区上部岩土体原始应力平衡状态被打破, 进而引发岩体断裂、弯曲、冒落等一系列地质移动, 并最终在采空区上方形成下沉盆地且积水成塘。与常规水塘、小型湖泊及水库等天然或人工水域相比, 采煤沉陷区水域的环境本底更为复杂, 主要体现在水下地形地貌与工程地质条件的高度异质性。此类水域的地形及地质特征受到原生地形地貌、地下岩层分布格局、煤炭开采工艺、开采范围及开采时序等多重因素的耦合作用, 其演变过程具有较强的不可预测性。更重要的是, 沉陷过程本质上是岩体力学平衡失稳后的持续性地质响应, 这使得水下地形与地质条件始终处于动态变化过程, 最终导致采煤沉陷区水域的水环境呈现出复杂且不稳定的演变特征。目前, 鲜有研究探讨水面光伏对水体生态环境的影响。由此, 本研究拟通过文献调研归纳下光伏对采煤沉陷水域水环境研究进展。

## 一、光伏电站对采煤沉陷塘气象因子的影响

目前,光伏电站在陆地上使用多,基本为立柱式光伏。在干旱、阳光辐射强地区,光伏电板可阻挡部分太阳辐射,使地表水分蒸发减少,可提升土壤保水能力;遮阳区地表温度降低,使土壤水分蒸发速率减少,空气湿度有微量增加,可调节小区域气候;光伏板阻挡作用使风速降低,可提升空气湿度,提高植被存活率、生长率和覆盖率;荒漠地区光伏更可增加地表粗糙度,使地表风速降低、沙率降低,起到阻风、固沙作用。由此,陆地光伏电站改善了陆地表面气象因子。



(a) 漂浮式光伏(水深超3m使用) (b) 立柱式(水深3m内使用)

图1 采煤沉陷水域光伏电站

相比陆地光伏电站,水域光伏电站存在两种模式(图1)。当水深<3米时,使用立柱式光伏电站;当水深>3米时,使用漂浮式光伏电站。目前,漂浮式和立柱式光伏电站已用于采煤沉陷水域。采煤沉陷水域作为一类典型的特殊地表水体,其水文连通性呈现显著分异特征:部分区域与天然水系存在水力联系,而多数则为相对封闭的孤立水体。该类水体的补给来源具有多元复合性,涵盖地表径流、浅层地下水、生活污水及矿井排水等多种途径;同时,受煤矿开采进程的持续驱动,其水深与水域面积始终处于动态演变状态。基于功能属性划分,采煤沉陷水域兼具水源涵养、水产养殖及湿地生态修复等多重生态服务功能。已有研究表明,水面光伏设施的布设可对水体微环境产生直接干预效应:吴慕丹等<sup>[1]</sup>的研究证实,水面光伏系统可改变水体表层的地局风方向特征;Sahu等<sup>[2]</sup>与Alhejji等<sup>[3]</sup>亦指出,光伏电站的面板遮蔽作用能够显著削弱水体表面的光照强度。值得注意的是,若在同一采煤沉陷水域内同时布设漂浮式与立柱式两种光伏开发模式,由于两类电站的光伏面板在离水高度、布设倾角等结构参数上存在明显差异,势必会造成其影响范围内水体表层的风速、气温及光照强度等关键环境因子呈现出差异化的分布格局。如:程晓静等<sup>[4]</sup>发现光伏电站降低采煤沉陷塘水体的光照强度,且立柱光伏电站比漂浮光伏电站对光照强度降低光照强度更加明显。

## 二、光伏电站对采煤沉陷塘水质的影响

水域上方气象因子变化会影响水体的水环境质量。一般情况下,光照可改变水温,蒸发率,也可通过影响藻类光合作用速率改变溶解氧含量;光照强,二氧化碳量减少,pH会上升;水温升高也会导致pH降低;蒸发率变化会改变水体总盐和悬浮物;湿度大、气压低,溶解氧低;风速也会影响透明度和悬浮物(SS)。已有研究证实,漂浮式光伏电站可通过调控局地气象因子进而改变水体环境特征。光伏面板对水面的遮蔽作用,能够拦截部分太

阳辐射并削弱水面风速,由此改变水体表层的光照分布、空气流通速率及湿度条件,最终通过影响水体热收支与蒸发过程,引发水体温度、蒸发速率等关键水文参数的改变,并进一步驱动水质指标的动态变化<sup>[5]</sup>。Lee et al<sup>[6]</sup>发现韩国 Geumgwang 农业水库中漂浮电站建成后,光伏水体温度、pH、溶解氧、叶绿素a、化学需氧量(COD)、TN和TP随时间和水深变化,但由于漂浮光伏面积太小( $\leq 0.5\%$ ),光伏水体的水质指标与正常水体指标变化没有差异。Château et al.<sup>[7]</sup>的研究发现,当水面漂浮式光伏电站的面板覆盖度达到40%时,养殖鱼塘水体中的DO浓度会显著下降,同时水体生化需氧量(BOD)、叶绿素a含量、水温、TN及SS等指标也呈现降低趋势,而TP含量则出现明显上升。综上可见,目前关于水面光伏电站对水环境影响的相关研究存在两个显著的聚焦特征:其一,研究对象多局限于水库、鱼塘等非采煤沉陷型自然或人工水体,针对沉陷区特殊水域的探索相对匮乏;其二,研究载体以漂浮式光伏电站为主,对其他光伏布设模式的关注较少。现有研究得出的核心结论可归纳为:在非沉陷水域中,漂浮式光伏电站的面板覆盖规模是调控水域上方局地气象因子的关键变量,其差异会进一步决定水体环境中各项水质指标的演变趋势与波动幅度。近年来,立柱式光伏电站和漂浮式电站均用于采煤沉陷水体,然而采煤沉陷水体水环境质量研究目前还主要集中在沉陷水域的水体理化性质、水化学特征、营养盐(N、P)变化及富营养化特征变化等方面。现有研究发现采煤沉陷水域水质变化其独特性:具时间和空间分布特性、随沉陷年龄、季节、面积、水深等变化、存在一定富营养化,部分水域中重金属元素浓度存在超标现象,总碱度、总硬度、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 随时间推移有累积增长效应,多数在地表水Ⅲ-Ⅳ类水质标准内<sup>[8]</sup>。

相较于单一的漂浮式光伏模式,漂浮式与立柱式光伏电站在水面遮蔽率上存在显著差异,这一差异可能导致采煤沉陷塘水域的光照强度、风速等局地气象因子产生分异,进而使两种光伏模式影响下的沉陷水体水质指标呈现出不同特征。已有研究表明,光伏电站的布设可显著改变采煤沉陷塘的水质状况,具体表现为水体DO与pH值的提升,以及水温、COD、电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、TN及叶绿素a含量的降低,而对透明度(SD)、TP和氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )的影响则相对微弱。进一步的对比分析显示,不同类型光伏电站对水质指标的影响程度存在明显梯度差异:就DO与pH指标而言,影响程度表现为立柱式光伏电站沉陷塘>漂浮式光伏电站沉陷塘>非光伏沉陷塘;对于WT、COD及叶绿素a指标,其影响程度排序为非光伏沉陷塘>立柱式光伏电站沉陷塘>漂浮式光伏电站沉陷塘;在EC、TDS与TN指标的变化上,整体呈现非光伏沉陷塘>漂浮式光伏电站沉陷塘>立柱式光伏电站沉陷塘的规律;SD的变化趋势则为漂浮式光伏电站沉陷塘>非光伏沉陷塘>立柱式光伏电站沉陷塘;而TP与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标的变化梯度为立柱式光伏电站沉陷塘>非光伏沉陷塘>漂浮式光伏电站沉陷塘。

除此之外,光伏电站的建设还会在一定程度上影响采煤沉陷塘水体中的重金属含量。胡雨琴等<sup>[9]</sup>的研究发现,不同光伏模式下的沉陷塘水体中,铬(Cr)、锰(Mn)、锌(Zn)等微量元素的浓度存在显著差异,且总体表现为漂浮式光伏电站>立柱式

光伏电站的分布特征。综上所述,光伏电站对采煤沉陷水域水质的影响具有明显的模式依赖性,不仅不同光伏模式的作用效果存在差异,其对各类水质指标的影响程度与方向亦呈现出显著的差异性。

### 三、光伏电站对浮游植物群落的影响

采煤沉陷水域中浮游植物种类、数量变化及演替与一般湖泊和水库变化规律有差异,它们随沉陷时间、沉陷地点和季节变化。一般而言,水环境因子(光照、温度、透明度、营养盐(TN和TP)等)变动改变浮游植物群落结构、生物量及其演替等变化。

万阳等<sup>[10]</sup>发现水温、透明度、总磷和硝酸盐氮是影响沉陷水域浮游植物群落结构的主要环境因子,水温是影响浮游植物时间变化关键因子,硬度水质是影响采煤塌陷区小型湖泊浮游植物群落演替和生物量季节变化重要原因。有人研究发现藻类生物量与TP、TN和COD<sub>Cr</sub>分别呈显著正相关,藻类群落生物量与水深呈显著负相关,水量季节变化亦可影响藻类季节变化。汪晨琛等<sup>[11]</sup>探讨不同沉陷时间序列湖泊浮游植物群落演替特征,发现水温、营养盐、透明度、叶绿素a是影响浮游植物群落结构主要因子。徐鑫等<sup>[12]</sup>对比研究淮南3个小型采煤沉陷湖泊浮游植物群落结构,发现光照、水温和营养盐含量是造成浮游植物细胞丰度、生物量、多样性和均匀度差异的主要影响因子。可见,采煤沉陷水域水环境因子(光照、水温、水深、透明度、营养盐(TN、TP等)和叶绿素a等)变化也确实影响浮游植物,它们随沉陷时间、地点及季节变化导致了浮游植物类群不同、结构及演替序列差异。

程晓静<sup>[4]</sup>通过对淮南煤矿区不同类型光伏沉陷塘的系统性

研究,证实光伏电站的布设确实会对采煤沉陷塘浮游植物的群落结构特征产生显著调控作用。具体而言,在同一季节尺度下,不同沉陷塘内浮游植物优势物种的数量呈现非光伏沉陷塘>漂浮式光伏沉陷塘>立柱式光伏沉陷塘的梯度变化规律;浮游植物的细胞密度与生物量的变化趋势与之相近,表现为非光伏沉陷塘>立柱式光伏沉陷塘>漂浮式光伏沉陷塘;而浮游植物Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀性指数的排序则为漂浮式光伏沉陷塘>立柱式光伏沉陷塘>非光伏沉陷塘。整体来看,与无光伏布设的对照沉陷塘相比,漂浮式与立柱式光伏沉陷塘的浮游植物物种数、密度及生物量均呈现不同程度的下降趋势;但在生物多样性指标方面,Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数及Margalef丰富度指数则表现出相反的规律,具体排序为非光伏沉陷塘>漂浮式光伏沉陷塘>立柱式光伏沉陷塘。此外,针对冬季光伏沉陷塘的专项研究发现,水面光伏设施的存在有助于降低水体盐度,同时维持水体温度与溶解氧含量的相对稳定。该研究进一步指出,水面光伏系统可对浮游植物群落结构产生特定影响,且不同光伏模式的作用强度存在差异,其中漂浮式光伏对沉陷塘浮游植物群落的影响程度显著低于立柱式光伏。从驱动因子来看,立柱式光伏沉陷塘浮游植物群落多样性的变化主要受水温与TN含量的共同调控,而漂浮式光伏沉陷塘浮游植物群落的演变则主要受水温这一单一因子的影响。

综上,从现有研究进展看,光伏电站应用于我国采煤沉陷水域前景较好,但尚缺乏光伏对水环境生态影响研究。国外已经开展水库、湖泊等漂浮光伏电站对水环境质量的影响研究,而我国将立柱式和漂浮式光伏水面电站应用于采煤沉陷水域,这一特殊的封闭水体,显得更具特色。两种光伏模式下,水面气象因子如何变化,水环境质量、浮游植物等的变化趋势等均还有待深入探索。

### 参考文献

- [1] 吴慕丹,袁万.漂浮式水上光伏电站对湖库风生流作用机理的研究[J].太阳能,2021(12):30-36.
- [2] Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66(12): 815-824.
- [3] Alhejji A, Kuriqi A, Jurasz J, et al. Energy Harvesting and Water Saving in Arid Regions via Solar PV Accommodation in Irrigation Canals[J]. Energies, 2021, 14(9): 2620.
- [4] 程晓静.水面光伏对采煤沉陷塘水环境质量和浮游植物群落结构的影响研究[D].安徽理工大学,2022.000265.
- [5] Taboada M E, C áceres L, Graber T A, et al. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling[J]. Renewable energy, 2017, 105: 601-615.
- [6] Lee I, Joo J C, Lee C S, et al. Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 2017, 39(5): 255-264.
- [7] Château P A, Wunderlich R F, Wang T W, et al. Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 654-666.
- [8] Qitao Yi, Xiaomeng Wang, Tingting Wang, et al. Eutrophication and nutrient limitation in the aquatic zones around Huainan coal mine subsidence areas, Anhui, China. Water Science and Technology, 2014, 70(5): 878-887.
- [9] 王兴明,胡雨琴,范廷玉,等.淮南光伏沉陷塘微量元素变化特征及健康风险评价[J].环境化学,2025,44(1):273-287.
- [10] 万阳,周忠泽,汪晨琛,等.迪沟采煤沉陷湖泊浮游植物群落结构特征[J].生物学杂志,2018,1:75-81.
- [11] 汪晨琛,吴奇丽,万阳,等.淮北临涣采煤沉陷水域浮游植物群落结构特征及其影响因子[J].生物学杂志,2019(03):37-41,87.
- [12] 徐鑫,易齐涛,王晓萌,等.淮南矿区小型煤矿塌陷湖泊浮游植物群落结构特征[J].水生生物学报,2015,39(4):740-750.