

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.027

水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区 水生态环境的影响

宋鑫^{1,2}, 贝耀平^{1,3}, 袁丙青^{1,3}, 曹冬梅^{1,3}, 谭红兵²

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;
3. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 101100)

摘要:为研究我国淮南采煤沉陷积水区特大型漂浮式水上光伏(FPV)电站对水生态环境的影响,对不同FPV覆盖率的湖泊及周围水体分季节进行水生态关键指标监测和分析,通过数理统计方法对比分析了典型水生态指标活性叶绿素与藻蓝蛋白、常见水质参数和重金属元素浓度。结果表明:光伏板的覆盖减弱了水生态指标与营养盐指标之间的相关性,降低了水体中浮游植物对营养盐的利用率,约50%的FPV覆盖率可防止水体进一步富营养化;采煤沉陷积水区中重金属元素浓度极低,且FPV组件未导致水体中重金属元素浓度的升高;在类似淮南大面积采煤沉陷积水区开展FPV电站建设是实现生态环境改善和高效开发利用废弃矿山值得探索的重要方向。

关键词:水上光伏电站;水生态环境;富营养化;采煤沉陷积水区;淮南市

中图分类号:X82 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0204-08

Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City//SONG Xin^{1,2}, BEI Yaoping^{1,3}, YUAN Bingqing^{1,3}, CAO Dongmei^{1,3}, TAN Hongbing² (1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. China Three Gorges Renewables (Group) Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: To study the impacts of super-large floating photovoltaic (FPV) power plants on the key indicators of the water ecological environment in the coal mining subsidence water area in Huainan, China, the key water ecological indicators of lakes and surrounding water bodies with different photovoltaic panel coverage rates were monitored and analyzed in different seasons. Based on contrasting and analyzing the concentrations of typical water ecological indicators of chlorophyll and phycocyanin, common water quality parameters, and heavy metal element concentrations with mathematical statistical methods, it was found that the coverage of photovoltaic panels weakened the correlation between water ecological indicators and nutrient indicators, and reduced the utilization rate of nutrients by phytoplankton in the water body, and FPV with a coverage rate of about 50% could prevent further eutrophication of the water body; the concentrations of heavy metal elements were very low in the whole area, and the photovoltaic modules laid on water did not increase the concentrations of heavy metal elements in the water body. The construction of FPV power plants in large-scale coal mining subsidence water areas similar to those areas in Huainan is an important direction that is worth exploring for the improvement of the ecological environment and efficient development and utilization of abandoned mines.

Key words: floating photovoltaic power plant; water ecological environment; eutrophication; coal mining subsidence water area; Huainan City

淮南市由于煤炭的开采形成了大量的采煤沉陷积水区,如何治理和利用这些采煤沉陷积水区是一个非常紧迫而重要的课题^[1-3]。漂浮式水上光伏

(floating photovoltaic, FPV)电站的发展为治理采煤沉陷积水区提供了新的技术,在采煤沉陷积水区开发FPV电站具有得天独厚的优势^[4],不仅可以有效

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(34007172)

作者简介:宋鑫(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文地质研究。E-mail: songx611@163.com

通信作者:贝耀平(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事新能源研究。E-mail: bei_yaoping@ctg.com

利用采煤沉陷积水区闲置废弃的水域资源,解除光伏项目开发占用土地因素的约束,拓宽光伏发电的应用^[5],同时可以提高发电效率^[6],减少水体的自由表面蒸发^[7],实现综合效益最大化。

作为一项全新的产业,目前国际上对 FPV 的研究大多集中在设计和经济效益方面,对 FPV 电站建设给水生态环境带来的影响研究较少,特别是对水生态关键指标的影响程度或利弊尚不清楚^[8-9]。国际上零星的研究表明,FPV 电站建设本身可能对水生态环境影响不大^[10]。光伏板遮盖减少阳光照射,可能会减少降解藻类生物量导致的氧气消耗,并可能防止有毒藻类的发展,有利于水生态环境的改善,从长远看可以实现良性向好发展。相反,也有研究认为 FPV 的应用会减少入射到水面的光,降低沉水植物对浮游植物的竞争力,导致浮游植物生物量的增加和沉水植物量的减少,进而使整个水生态环境恶化^[11-12]。国际上也有一些学者通过水动力水质模型,探讨 FPV 电站对水生态的影响,发现 FPV 覆盖率在 40% ~ 50% 之间时,FPV 电站的生态、经济效益最高^[13-14]。另外,FPV 组件多以高密度聚乙烯材料为主,长时间曝晒、浸泡,也可能向水体释放重金属元素,但至今未见这方面的相关监测评估。总之,目前有关 FPV 电站对水生态环境影响的研究主要针对一些小型 FPV 电站,考虑到不同地域的气候环境可能产生不同的影响,对于类似在淮南采煤沉陷积水区建设的特大型 FPV 电站对水生态环境关键指标的影响,亟待加强监测研究,以实现对废弃矿山或水域的有效利用与生态环境治理并举,最终达到绿色可持续发展的目的。本文在现场多次调研及不同类型水体取样分析的基础上,重点讨论分析了 FPV 电站对水质的影响,并评估 FPV 电站建设对水生态环境关键指标的影响,可为采煤沉陷区生态环境治理与高效综合利用提供参考。

1 研究区概况

研究区为世界最大 FPV 电站建设区——淮南潘集采煤沉陷区,位于安徽省淮南市潘集区。淮南潘集 FPV 电站项目建设区占地 2.84 km²,项目用地为已稳定的沉陷区水面,总装机容量为 150 MW,其中 1、2 号湖装机容量为 105 MW,采用 1.6 MW 组串式光伏发电单元;3、4 号湖装机容量为 45 MW,采用 2.5 MW 集中式方案。变压器和逆变器均匀分布在光伏区四周,土建采用漂浮式。区内气候属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温在 14.3 ~ 16.4 °C 之间,多年平均降水量为 937.2 mm,降水量年际差异较大,且年内不同季节降水量差别也很大,夏季降水

量超过全年的 50%。淮河是区内主要地表水系,自西向东贯穿全区,且有泥河、测河、西淝河、窑河、架河等支流分布。区内湖泊众多,自然湖泊有城北湖、瓦埠湖、焦岗湖、石涧湖、高塘湖、花家湖;由于采煤沉陷区地势低洼,又形成大小不等、深浅不同的新生湖泊。采煤沉陷区地表水、地下水互补关系随着季节的变化波动,补给量与降水量关系密切。丰水季节沉陷区地表水渗漏补给周围地下水,枯水季节地下水排泄补给沉陷区地表水体。国家生态环境部编制的《建设项目环境影响报告表》中对 FPV 电站建设前的淮南泥河与沉陷区水环境评价结果表明,湿季泥河与沉陷区基本能满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅳ类水标准,淮南地区地表水环境较差,同时淮南采煤沉陷积水区面积较大,在该区域建设 FPV 电站的水生态环境示范区具有重大意义。

2 研究方法

2.1 水生态环境指标的选取

针对 FPV 电站影响下的淮南采煤沉陷积水区水生态环境,重点选择具有代表性的水生态指标,如活体叶绿素(Chl)与藻蓝蛋白(PC)作为水生态关键指标。Chl 是浮游植物现存量的重要指标,也是评价湖泊富营养状态的重要指标^[15]。然而,Chl 的浓度并不能区分真核浮游植物和蓝藻,因此选择 PC 作为另一关键指标指示蓝藻生物量,根据其浓度来判断水华爆发的可能性,这对于混合浮游植物群落中蓝藻的选择性检测尤为重要^[16]。其次是对水生态环境影响较大的营养盐指标,主要包括总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)等。氮和磷是影响藻类生长最重要的营养盐,也是藻类生长所必需的营养物质;氨氮既是无机氮营养盐的一种形式,也可以作为指示人类活动污染的指标,其浓度的大小可以反映人类活动对水体污染的影响程度。温度(*T*)、酸碱度(pH 值)、电导率(*C_E*)、溶解性固体总量(TDS)和溶解氧(DO)等属于基本常规水质参数,它们能够表征水体的一般物理化学状态,对水生态环境也有一定的影响。另外,本研究也针对性地选择一些重金属元素作为评价指标,重金属是水环境中常见的污染物,具有持久性、不可降解性、可累积性等特点,对人体健康具有很大的潜在威胁,是全球关注的重点^[17-20]。研究表明,煤中有超过 80 种重金属元素,其中超过 20 种是有害金属元素,使得采煤沉陷积水区重金属含量状况更加引人关注^[21]。FPV 电站使用的高密度聚乙烯材料浮体与支撑结构经过长时间的曝晒、浸泡,也有可能向水体释放重金

属元素。根据 NB/T 10187—2019《水上光伏系统用浮体技术要求和测试方法》和 T/CPIA 0016—2019《水上光伏发电系统用高密度聚乙烯浮体》等行业标准与水质评价常用的重金属元素,本文重点选取 Cu、Zn、As、Cd、Cr、Pb、Fe、Mn 等 8 种重金属元素作为相关指标。

2.2 采样点分布

在野外多次调查的基础上,选择 FPV 覆盖的 4 个采煤沉陷积水区作为重点研究区(图 1 中 1~4 号湖),于 2020 年 5 月(干季末)与 9 月(湿季末)系统采集了各类水体样品,两次共采集水样 88 个。其中 1、2、3 号湖 FPV 覆盖率分别为 55%、52% 和 55%,为高覆盖区;4 号湖 FPV 覆盖率 8%,为低覆盖区。将周边未安装 FPV 且受渔业养殖影响较小的湖泊作为无覆盖区,以附近河流(泥河上游未受到 FPV 影响的河段)作为背景区。湿季是浮游植物生长最茂盛的季节,因此对重点湖泊 1 号湖设计了网格式加密采样,同时考虑了采样点与光伏板之间的距离,在 1 号湖共计采样 28 个。

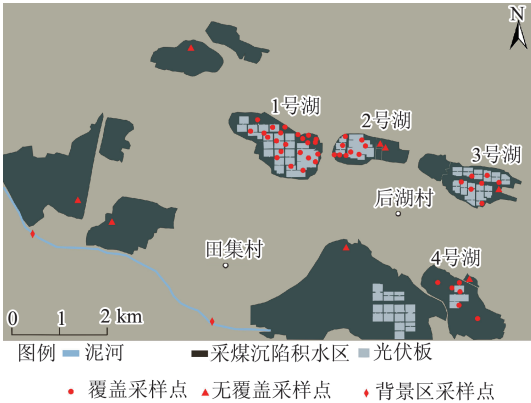


图 1 淮南潘集 FPV 电站主要建设区与采样点分布

Fig.1 Distribution of main FPV power plant construction areas and sampling points in Panji District of Huainan City

2.3 样品采集与测定

按照设计的采样点分布原则采集各类水体样品,现场用 0.45 μm 滤头过滤,并根据各类测试指标要求加入试剂,如阳离子测定时加入浓缩过的高纯硝酸,使 pH 值小于 2,样品带回实验室后低温保存。采样过程中,对采样点水体现场使用 AP-2000 多功能水质参数仪测定 T 、pH 值、 C_E 、DO 和 TDS 等基本水质参数;使用 Aquafluor 双通道便携式叶绿素仪测定水生态关键指标 Chl 和 PC,误差小于 5%;使用哈纳 HI83200 多参数离子浓度测试仪测定指标 $\text{NH}_3\text{-N}$,误差小于 2%;微量重金属采用电感耦合等离子体光谱仪和质谱仪测定,误差分别小于 5% 和 2%。依据 GB 11893—89《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》和 HJ 636—2012《水质 总氮的测定 碱性过硫

酸钾消解紫外分光光度法》测定水中 TP 和 TN,误差分别小于 2% 和 5%。样品采集与测定过程中设置了平行样品,样品与平行样品测量值的标准误差均小于上述仪器误差。

2.4 数据处理

为更好地研究水质指标干、湿季变化规律,将数据较少的低覆盖区、无覆盖区、背景区作为一个整体,并重新命名为低覆盖和无覆盖区,使用 SPSS 软件分别对其水生态关键指标 Chl 和 PC 与其他水质指标进行相关性分析和逐步回归分析^[22]。为评价 FPV 电站对 Chl 与 PC 质量浓度空间分布的影响,利用 ArcGIS 软件对湿季 1、4 号湖(分别代表高覆盖区、低覆盖区)Chl 与 PC 的质量浓度进行插值,获得研究区空间分布趋势图。选用 Chl、TP 和 TN 作为典型因子,运用单因子营养状态指数法和相关加权综合营养状态指数法进行湖泊富营养化分析,其中背景区采样点较少,因此将无覆盖区与背景区合并在一起重新命名为对照区进行计算。最后将水生态关键指标 Chl 和 PC 及营养盐指标 TP、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为主要因素,结合水质常规指标 DO 和 TDS 及水化学指标 F^- 对不同类型、不同季节水体进行基于水生态关键指标的水质综合评价。由于分析结果显示研究区水体重金属元素浓度都很低,未出现超标现象,故不参与本次评价。评价方法选择模糊综合评价,为保证结果的准确性,分别通过层次分析法和熵权法确定权重,评价结果为 IV 或 V 类水视为超标^[23-24]。

3 结果与分析

3.1 水生态环境指标变化规律

3.1.1 水生态环境指标干、湿季变化规律

光伏板覆盖区(高、低覆盖区)与无覆盖区、背景区常规水质参数 T 、pH 值、 C_E 以及 DO 和 TDS 的质量浓度变化不大(图 2),营养盐指标 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 的质量浓度在覆盖区与无覆盖区无明显分布规律。相比之下,无论是干季还是湿季,高覆盖区水生态关键指标 Chl 和 PC 的质量浓度都显著低于其他水体,这表明高 FPV 覆盖率可以显著抑制水中浮游植物(包括蓝藻)的过量生长。无覆盖区与背景区 Chl 的质量浓度在干、湿季基本相同,可能与湿季光照强度过高引起光抑制现象有关^[25]。当浮游植物接收到过多的光照强度,超过其可以利用的阈值时,会引起浮游植物生产能力下降,这也是很多水体中 Chl 的质量浓度春季大于夏季的主要原因。相比之下,低覆盖区 Chl 的质量浓度在湿季却显著上升。在 FPV 覆盖率较低的湖泊中,由于光伏板覆盖的水

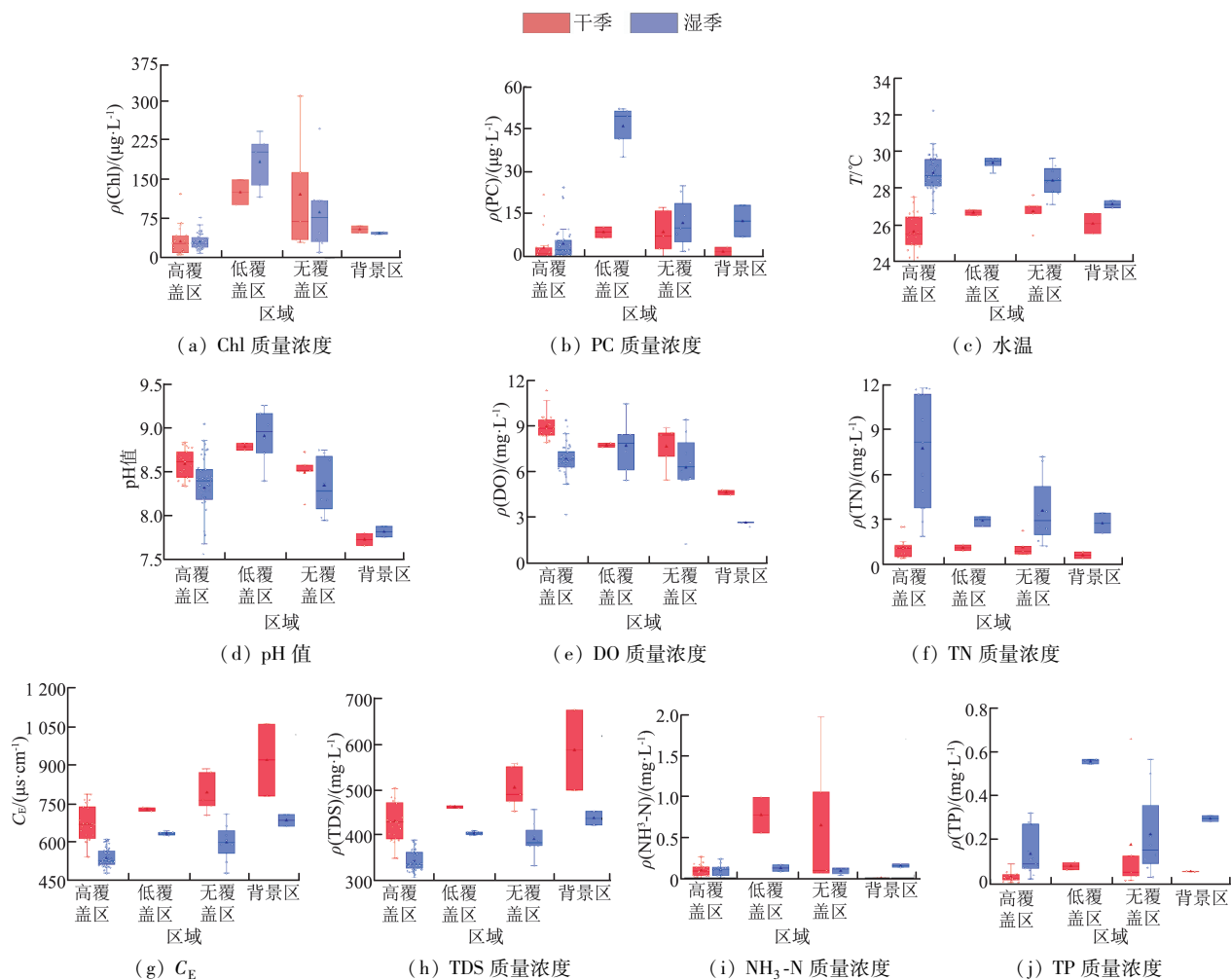


图2 水生态环境指标箱型图

Fig. 2 Box diagrams of water eco-environmental indicators

域会减弱表层光抑制现象,因此光伏板覆盖的水域会成为浮游植物适宜生长的“温床”,从而导致 Chl 的质量浓度在湿季显著上升,使局部水质恶化。

高覆盖区 Chl 和 PC 的质量浓度与营养盐指标的相关系数 r 和线性回归的确定性系数 R^2 都显著低于低覆盖区和无覆盖区(表 1、2、3),表明高 FPV 覆盖率可以降低水体中浮游植物对营养盐的利用率。湿季高覆盖区水体中 TP 和 TN 的质量浓度较高,但 Chl 和 PC 的质量浓度却很低(图 2),表明即使高覆盖区的水体中营养盐浓度较高,但光伏板的遮光效应会抑制浮游植物的生长,不会导致浮游植物过度生长,从长远看有利于防止水质恶化。

表 1 高覆盖区水生生态关键指标与水质指标的相关系数

Table 1 Correlations between typical water ecological indicators and water quality indicators in high coverage area											
季节	水生态关键指标	<i>T</i>	pH 值	DO	<i>C</i> _E	TDS	NH ₃ -N	TP	TN	Chl	PC
干季	Chl	-0.073	0.158	0.336	0.239	0.257	-0.164	0.376	-0.216	1	
	PC	0.074	-0.317	-0.298	-0.042	-0.069	-0.194	0.704 **	0.497	0.265	1
湿季	Chl	-0.291	-0.342 *	-0.070	-0.157	-0.230	-0.017	-0.064	-0.366	1	
	PC	-0.156	-0.070	-0.289	-0.116	-0.121	-0.055	-0.081	0.396	0.552 **	1

注: * 表示显著相关($p < 0.05$), ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。下同。

3.1.2 Chl 和 PC 质量浓度空间分布规律

现场考察发现,1 号湖东侧水域是一个独立的小池塘,无光伏板覆盖但有渔业养殖,在干季与 1 号湖不连通。干季时 1 号湖东侧池塘 Chl 和 PC 的质量浓度比 1 号湖高得多。湿季时由于道路沉陷,1 号湖与东侧池塘联通,对比分析发现(图 3(a)(b)),1 号湖光伏板覆盖的水域 Chl 和 PC 的质量浓度比无覆盖区域都要低,且除 1 号湖东侧小鱼塘和附近区域外,Chl 和 PC 的质量浓度都相对较低,这些特征充分表明高 FPV 覆盖率可以抑制浮游植物的过度生长,防止水体进一步富营养化,遏制水体恶化趋势。

表 2 低覆盖区和无覆盖区水生态关键指标与水质指标的相关系数

Table 2 Correlations between typical water ecological indicators and water quality indicators in low coverage and non-covered areas											
季节	水生态关键指标	T	pH 值	DO	C_E	TDS	NH_3-N	TP	TN	Chl	PC
干季	Chl	-0.528	0.512	-0.117	0.127	0.068	0.709 *	0.912 **	0.508	1	
	PC	-0.179	0.669 *	0.220	-0.224	-0.271	0.828 **	0.691 *	0.733 *	0.813 **	1
湿季	Chl	0.620 *	0.490	0.410	0.134	-0.010	-0.204	0.345	0.284	1	
	PC	0.656 **	0.644 **	0.479	0.187	0.033	0.113	0.609 *	-0.102	0.835 **	1

表 3 干季研究区水生态关键指标与营养盐指标逐步回归方程

Table 3 Stepwise regression of relationships between typical water ecological indicators and nutrient indicators in dry season in study area		
区域	R^2	回归方程
高覆盖区	0.604	$\rho(PC) = 21.53 + 202.1\rho(TP)$
低覆盖和无覆盖区	0.947	$\rho(Chl) = 35.80 + 51.40\rho(NH_3-N) + 344.7\rho(TP)$
低覆盖和无覆盖区	0.828	$\rho(PC) = 2.054 + 6.150\rho(NH_3-N) + 13.89\rho(TP)$

注:湿季研究区由于数据之间显著性不强而无法列出回归方程。

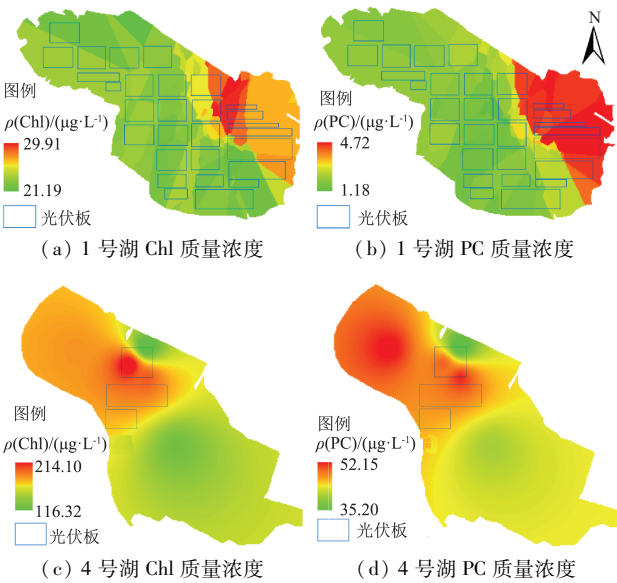


图 3 湿季研究区 Chl 和 PC 质量浓度空间分布
Fig. 3 Spatial variations of Chl and PC mass concentrations in wet season in study area

4 号湖 FPV 覆盖率较低,野外调查明显观察到 4 号湖相较其他 3 个湖泊水质较差。4 号湖 Chl 和 PC 的质量浓度较高值出现在光伏板覆盖的水域(图 3(c)(d)),而西北、东南方向大片未装光伏板

的水域质量浓度相对较低,验证了湿季存在的光抑制现象。过低 FPV 覆盖率不能显著降低光照强度,未被光伏板覆盖的区域会发生光抑制现象;光伏板大幅减少了下伏区域光照的直射,光伏板覆盖水域的浮游植物只能利用折射、反射的光能,未达到其能够利用的光照强度阈值,因此光抑制现象不明显,浮游植物的生长情况反而比没有光伏板覆盖水域更好。4 号湖 Chl 和 PC 质量浓度的空间分布表明,湿季时过低的 FPV 覆盖率可能会减弱光抑制现象带来的影响,浮游植物能够在光伏板覆盖的水域更好地生长,导致水体富营养化的趋势进一步加剧。

3.1.3 重金属元素浓度特征

从研究区重金属元素质量浓度统计结果来看(表 4),各重金属元素的质量浓度都很低,其浓度远小于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的 I 类水和水源地的标准限值,且有、无光伏板覆盖水域的重金属元素浓度没有明显差别,表明研究区水体本身重金属元素浓度很低,且没有受到 FPV 材料的污染,至少从目前来看,有光伏板覆盖水域与背景区重金属元素浓度没有显著差别。

表 4 研究区重金属元素平均质量浓度

单位: μg/L

Table 4 Average mass concentrations of heavy metal elements in study area

unit: μg/L

区域	季节	$\rho(Cu)$	$\rho(Zn)$	$\rho(As)$	$\rho(Cd)$	$\rho(Cr)$	$\rho(Pb)$	$\rho(Fe)$	$\rho(Mn)$
高覆盖区	干季	0.75	1.11	2.45	0.01	0.05	0.01	0.16	0.09
	湿季	0.45	3.78	6.34	—	0.09	0.05	1.44	0.24
低覆盖区	干季	0.80	1.58	6.11	0.02	0.11	0.07	1.34	0.14
	湿季	0.30	0.70	11.76	—	0.10	0.04	1.35	0.79
无覆盖区	干季	0.53	—	7.39	0.01	0.06	0.01	0.76	8.60
	湿季	0.36	2.58	8.65	0.01	0.08	0.03	1.17	0.73
背景区	干季	0.40	0.22	5.47	0.01	0.06	0.18	0.19	0.18
	湿季	0.41	5.45	10.19	0.01	0.13	0.28	1.19	0.28

注:—表示浓度低于检测限。

初步分析认为,研究区重金属元素低浓度特征主要有以下 3 个方面的原因:①水域形成的时间较短,重金属元素还未进行长时间累积;②大气降水和地表径流的补给使地表水体更新速率较快,导致重金属元素浓度因稀释效应保持较低水平;③煤矸石中含有硫化物、碱金属化合物等物质,经过一系列物理、化学作用导致易溶碱性离子释放进入地表水体,使水体碱性增强,以弱碱-碱性水为主,有利于重金属元素发生沉淀^[26]。

3.2 基于水生态环境关键指标的水质评价

3.2.1 富营养化评价

富营养化评价结果见表 5,营养状态指数(Tucker-Lewis index, TLI)大于 50 表明水体开始进入富营养化状态。湿季高覆盖区(1、2、3 号湖)TP 和 TN 的 TLI 数值表明水体几乎都处于富营养化状态,而其 Chl 的 TLI 比低覆盖区、对照区都要低很多,表明高覆盖区相对较低的 Chl 质量浓度不是由于区域性营养盐缺失,而是与光伏板的覆盖有关。综合 TLI 数值表明,整个采煤沉陷区水体都呈现富营养化状态,与 FPV 电站建设没有明显的相关性。结合上文结论不难发现,FPV 电站本身虽然不能降低水体中

营养盐的浓度,但较高的 FPV 覆盖率可以降低水体中浮游植物对营养盐的利用率,抑制浮游植物特别是藻类的过度生长,避免水体发生水华,从长远看可以有效防止水体进一步富营养化。

3.2.2 水质评价

由于湖泊面积较小,各采样点距离较近,因此挑选出 45 份典型样品进行了比较全面的水质指标检测。分别使用层次分析法与熵权法,从主观与客观两个方面确定模糊综合评价中各因子的权重,结果显示,虽然两种方法获得的权重差别较大,但是评价结果却相差不大(表 6)。无论哪种方法,高覆盖区基于水生态关键指标的水质评价结果都比较好,而低覆盖区与背景区(未受到 FPV 电站影响的上游河段)湿季时的水质都比较好,无覆盖区中既有水质较好的湖泊,也有水质极差的湖泊。这进一步表明高 FPV 覆盖率对水体富营养化趋势有抑制作用,至少不会使水质进一步恶化。

4 结 论

a. 水生态关键指标与水质指标干、湿季相关性分析和逐步线性回归结果表明光伏板的覆盖减弱了

表 5 研究区营养状态指数

Table 5 Nutritional status indices of study area

区域	TLI						综合 TLI	
	干季 Chl	湿季 Chl	干季 TP	湿季 TP	干季 TN	湿季 TN	干季	湿季
1 号湖	47.79	64.30	36.58	49.16	60.07	95.92	47.40	68.41
2 号湖	69.68	64.10	45.11	73.74	57.46	88.54	69.38	68.99
3 号湖	61.54	67.40	34.88	57.73	52.51	75.43	61.50	66.79
4 号湖	79.33	81.74	56.64	84.30	53.30	72.66	—	78.67
对照区	75.25	72.44	62.61	70.80	54.57	53.30	68.95	71.68

注:—表示数据点较少,无法计算。

表 6 研究区水质评价结果

Table 6 Water quality evaluation results in study area

区域	季节	赋权法	水质类别组数					超标率/%
			I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	
高覆盖区	干季	层次分析法	13	1	0	1	0	6.7
		熵权法	13	1	0	1	0	6.7
	湿季	层次分析法	11	0	0	0	1	8.3
		熵权法	9	0	0	0	3	25.0
低覆盖区	干季	层次分析法	1	1	0	0	0	0
		熵权法	0	0	1	1	0	50.0
	湿季	层次分析法	0	0	0	0	2	100
		熵权法	0	0	0	0	2	100
无覆盖区	干季	层次分析法	3	0	0	0	2	40.0
		熵权法	3	0	0	0	2	40.0
	湿季	层次分析法	2	1	0	0	2	40.0
		熵权法	2	0	0	0	3	60.0
背景区	干季	层次分析法	2	0	0	0	0	0
		熵权法	2	0	0	0	0	0
	湿季	层次分析法	0	0	0	0	2	100
		熵权法	0	0	0	0	2	100

水生态指标与营养盐指标之间的相关性,降低了水体中浮游植物对营养盐的利用率。

b. 湿季 Chl 和 PC 的质量浓度空间分布规律显示 FPV 覆盖率较高(1 号湖 55%)的湖泊,光伏板覆盖的水域 Chl 和 PC 的质量浓度较低,而 FPV 覆盖率较低(4 号湖 8%)的湖泊,光伏板覆盖的水域为浮游植物提供生长的“温床”,造成 Chl 和 PC 的质量浓度过高,浮游植物大量过度生长。

c. 从监测分析来看,整个水域重金属元素浓度都很低,没有发现高覆盖率的光伏板浸泡水域重金属元素浓度增高迹象。

d. FPV 电站本身虽然不能降低水体中营养盐的浓度,但较高 FPV 覆盖率可以抑制浮游植物特别是藻类的过度生长,避免水体大规模水华的发生,从长远看有利于防止水体进一步富营养化。

e. 基于水生态关键指标的水质评价结果显示,FPV 覆盖率约为 50% 时,对水体富营养化趋势有抑制作用,至少不会使水质进一步恶化,是今后 FPV 电站建设可以参考的阈值。

参考文献:

[1] 王月,汪桂生. 近 15 年淮南矿区积水沉陷区遥感监测[J]. 科技创新与生产,2017(7):77-81 (WANG Yue, WANG Guisheng. Remote sensing monitoring of mining ponding subsidence in Huainan mining area during the past 15 years[J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2017 (7): 77-81. (in Chinese))

[2] 陆垂裕,陆春辉,李慧,等. 淮南采煤沉陷区积水过程地下水作用机制[J]. 农业工程学报,2015,31(10):122-131. (LU Chuiyu, LU Chunhui, LI Hui, et al. Groundwater influencing mechanism in water-ponding process of Huainan coal mining subsidence area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (10):122-131. (in Chinese))

[3] 金鑫. 浅谈淮南矿区采煤塌陷区治理模式[J]. 能源环境保护,2018,32(3):23-25. (JIN Xin. Discussion on the management modes of coal mining subsidence in Huainan mining area[J]. Energy Environmental Protection, 2018, 32 (3):23-25. (in Chinese))

[4] SONG J Y, CHOI Y. Analysis of the potential for use of floating photovoltaic systems on mine pit lakes: case study at the Ssangyong open-pit limestone mine in Korea [J]. Energies, 2016, 9(2):102-115.

[5] KOUGIAS I, BÓDIS K, JGER-WALDAU A, et al. The potential of water infrastructure to accommodate solar PV systems in Mediterranean Islands [J]. Solar Energy, 2016, 136:174-182.

[6] LIU H H, VIJAY K, JASON L, et al. Field experience and

performance analysis of floating PV technologies in the tropics [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2018, 26(12):957-967.

[7] TABOADA M, CACERES L, GRABER T, et al. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: experimental results and modeling [J]. Renewable Energy, 2017, 105:601-615.

[8] OLIVEIRA-PINTO S, STOKKERMANS J. Assessment of the potential of different floating solar technologies: overview and analysis of different case studies [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211:112747.

[9] CAZZANIGA R, CICU M, ROSA-CLOT M, et al. Floating photovoltaic plants: performance analysis and design solutions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 81(2):1730-1741.

[10] LEE I, JIN C J, KIM G Y. 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.

[11] YAMAMICHI M, KAZAMA T, TOKITA K, et al. A shady phytoplankton paradox: when phytoplankton increases under low light [J]. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences, 2018, 285(1882):20181067.

[12] GORJIAN S, SHARON H, EBADI H, et al. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:124285.

[13] BARADEI S E, SADEQ M A. Effect of solar canals on evaporation, water quality, and power production: an optimization study [J]. Water, 2020, 12(8):2103.

[14] HAAS J, KHALIGHI J, FUENTE A, et al. Floating photovoltaic plants: ecological impacts versus hydropower operation flexibility [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206:112414.

[15] 唐颖, 陈兰英, 蒋祖斌, 等. 升钟湖水体叶绿素 a 动态特征及其影响因子分析 [J]. 环境监测管理 & 技术, 2020, 32(1):56-59. (TANG Ying, CHEN Lanying, JIANG Zubin, et al. Spatio-temporal variation of water quality and identification of eutrophication-controlling factors in Shengzhong Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(1):56-59. (in Chinese))

[16] 李蓓, 李勇涛, 蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6):506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6):506-513(in Chinese))

[17] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮干支流污染物分布及变化规律 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):

29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 29-38. (in Chinese))

[18] 施玥,王沛芳,胡斌,等. 太湖和洪泽湖天然有机质与重金属结合特性研究[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 86-94. (SHI Yue, WANG Peifang, HU Bin, et al. Study on binding characteristics of natural organic matter and heavy metals in Taihu Lake and Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 86-94. (in Chinese))

[19] KUMAR P, DELSON P D, BABU P T. Appraisal of heavy metals in groundwater in Chennai City using a HPI model [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2012, 89(4): 793-798.

[20] MUHAMMAD S, SHAH M T, KHAN S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, Northern Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2011, 98(2): 334-343.

[21] 杨威,张婷婷,孙雨琛,等. 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊轮虫的群落结构特征[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 82-88. (YANG Wei, ZHANG Tingting, SUN Yuchen, et al. Community structure of rotifer in two small lakes of Huabei excavating coal subsidence region [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 82-88. (in Chinese))

[22] 刘立祥. 线性回归模型中自变量的选择与逐步回归方法[J]. 统计与决策, 2015(21): 80-82. (LIU Lixiang. The choice of independent variables in linear regression model and the method of stepwise regression [J]. Statistics & Decision, 2015(21): 80-82. (in Chinese))

[23] 向文英,杨静,张雪. 模糊综合评价法的改进及其在水库水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 344-348. (XIANG Wenying, YANG Jing, ZHANG Xue. Improvement of fuzzy comprehensive evaluation method and its application in reservoir water quality evaluation [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 344-348. (in Chinese))

[24] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

[25] 赵巧华,孙国栋,王健健,等. 水温,光能对春季太湖藻类生长的耦合影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 385-393. (ZHAO Qiaohua, SUN Guodong, WANG Jianjian, et al. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 385-393. (in Chinese))

[26] 孙鹏飞,易齐涛,许光泉. 两淮采煤沉陷积水区水体水化学特征及影响因素[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1345-1353. (SUN Pengfei, YI Qitao, XU Guangquan. Characteristics of water chemistry and their influencing factors in subsidence waters in the Huainan and Huabei mining areas, Anhui Province [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1345-1353. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-04-29 编辑:施业)

· 简讯 ·

2022 第十届中国水生态大会将在南阳召开

“十四五”时期,复苏河湖生态环境已成为提升大江大河大湖生态保护治理能力、推动新阶段水利高质量发展的重要工作。为了深入学习水利部推动水利高质量发展系列部署贯彻落实水利发展新理念,推进河湖复苏、生态修复,加强业务交流、学术研讨,更好地推动生态、美丽、幸福河湖的建设,经研究,由河海大学联合相关单位共同主办的 2022 第十届中国水生态大会拟于 2022 年 11 月(具体时间待定)在南水北调中线工程渠首南阳市举办。会议议题主要有:①河湖生态环境复苏关键技术;②南水北调水生态保护;③河湖生态流量保障体系;④水生态环境健康评价方法;⑤水环境污染治理策略及技术;⑥河湖生态数字化、智慧化平台建设;⑦河湖长制与幸福河湖建设;⑧地下水超采综合治理与管控;⑨国家水网建设、水安全保障与水生态修复;⑩南水北调精神与治水文化;⑪水资源管理与保护研究;⑫疏浚环保技术和装备成果;⑬海绵城市建设与黑臭水体治理;⑭水环境综合治理方案及应用案例;⑮海洋环境现状及保护对策;⑯其他。围绕会议主题进行了优秀论文征集,征文截止时间为 2022 年 9 月底。入选论文将收录至《第十届中国水生态论文集》。获奖论文推荐在《水资源保护》《河海大学学报(自然科学版)》《水利水电科技进展》等期刊上经审稿通过后正式发表。

(本刊编辑部供稿)