

光伏电站对沉陷塘冬季水质和浮游植物群落结构的影响

王兴明¹, 滕杰¹, 范廷玉¹, 储昭霞², 董众兵¹, 董鹏³

(1.安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室

安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2.资源与环境生物技术安徽普通高校重点实验室
淮南师范学院 生物工程学院, 安徽 淮南 232038; 3.昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650031)

摘要: [目的] 探究水面光伏电站对沉陷塘冬季水质及浮游植物群落结构特征影响, 为水面光伏应用于采煤沉陷水域提供数据参考。[方法] 对立柱光伏沉陷塘、漂浮光伏沉陷塘和无光伏沉陷塘(对照)的水体和浮游植物群落进行采样调查, 并通过 Pearson 相关性分析和逐步回归分析进行影响因素分析。[结果] 立柱光伏沉陷塘浮游植物共鉴定出 41 种, 漂浮光伏沉陷塘浮游植物共 40 种, 无光伏沉陷塘浮游植物共 47 种, 物种均以硅—绿藻型为主。相较对照沉陷塘, 水面光伏电站减弱了沉陷塘光照强度, 光伏沉陷塘的电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、氧化还原电位(ORP)和氨氮(NH₃-N)有所降低, 且立柱光伏电站上述指标小于漂浮光伏电站; 漂浮光伏电站还能降低水体化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)和总磷(TP)的含量。漂浮光伏、立柱光伏沉陷塘的浮游植物种类数、密度和生物量相比与对照沉陷塘均略有降低。而 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均表现为: 无光伏沉陷塘 > 漂浮光伏沉陷塘 > 立柱光伏沉陷塘。[结论] 水面光伏有助于降低冬季水体盐度, 保持水体温度与溶解氧含量, 并且上述指标立柱光伏电站改善效果比漂浮光伏电站好, 在一定程度上漂浮光伏电站还可以改善富营养水体。水面光伏能对浮游植物群落结构产生一定影响, 且漂浮光伏对沉陷水体浮游植物影响较立柱光伏小。Pearson 和逐步回归分析发现立柱光伏沉陷塘浮游植物群落多样性主要受水温(WT)、总氮(TN)影响, 漂浮光伏沉陷塘主要受水温(WT)影响。综合而言, 漂浮光伏电站更有利于沉陷塘水质, 对浮游植物群落结构影响最小。

关键词: 水面光伏; 采煤沉陷塘; 浮游植物群落结构; 环境因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0177-10

中图分类号: X826, TM615

文献参数: 王兴明, 滕杰, 范廷玉, 等. 光伏电站对沉陷塘冬季水质和浮游植物群落结构的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 177-186. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.019; Wang Xingming, Teng Jie, Fan Tingyu, et al. Influence of photovoltaic power stations on water quality and phytoplankton community structure in subsidence ponds in winter [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 177-186.

Influence of Photovoltaic Power Stations on Water Quality and Phytoplankton Community Structure in Subsidence Ponds in Winter

Wang Xingming¹, Teng Jie¹, Fan Tingyu¹, Chu Zhaoxia², Dong Zhongbing¹, Dong Peng³

(1. Anhui Province Engineering Laboratory of Water and Soil Resources

Comprehensive Utilization and Ecological Protection in High Groundwater Mining Area,

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui

232001, China; 2. Key Laboratory of Bioresource and Environmental Biotechnology of Anhui Higher Education

Institutes, Huainan Normal University, School of Biological Engineering, Huainan, Anhui 232038, China; 3. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650031, China)

收稿日期: 2024-03-28

修回日期: 2024-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“生物炭重构蚯蚓触圈微环境下污泥—蚯蚓多界面重金属迁移转化机理研究”(51878004); 国家重点研发计划项目(2020YFC1908601; 2019YFC1803501); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-075); 安徽省重点研究与开发计划项目(202104年06020027); 安徽省高校优秀人才重点支持计划项目(gxyqZD2021129); 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室开放课题(2022-WSREPMA-04); 2023年度省级新时代育人质量工程项目(研究生教育)(2023zyxwjxalk069); 2022年度省级质量工程项目(2022xxk026); 安徽开源园林绿化工程有限公司研发专项

第一作者: 王兴明(1981—), 男(汉族), 安徽省马鞍山市人, 博士, 副教授, 主要从事环境污染与生态修复、元素地球化学、固废资源化、环境毒理生态等方面的研究。Email: xmwang-2004@126.com.

Abstract: [Objective] The effects of surface photovoltaic (PV) power station on the structural characteristics of water quality and phytoplankton communities in subsidence ponds in the winter were investigated in order to provide data references for the application of surface PV in coal mining subsidence waters. [Methods] Water bodies and phytoplankton communities of column PV ponds, floating PV ponds, and non-PV ponds (comparison) were sampled and investigated, and the influencing factors were analysed using Pearson correlation and stepwise regression analyses. [Results] A total of 41 species of phytoplankton were identified in the column PV sinkhole pond, 40 species of phytoplankton in the floating PV sinkhole pond, and 47 species of phytoplankton in the pond without PV sinkholes; the diatom-green-algal type dominated the species. Compared with the control sinkhole ponds, the surface PV power plant effectively reduced the light intensity and lowered the levels of electrical conductivity, total dissolved solids, oxidation reduction potential, and ammonia nitrogen in the sinkhole ponds. Similarly, the floating PV power plants reduced the chemical oxygen demand, total nitrogen (TN), and total phosphorus contents in the water body. Additionally, the column PV power plant had lower levels of the above-mentioned indicators than the floating PV power plant. The number of phytoplankton species, density, and biomass in the floating PV and column PV sinking ponds were slightly lower than those in the control sinking ponds. The values for the Shannon-Wiener diversity index, Pielou homogeneity index, and Margalef richness index were ordered as follows: no PV pond > floating PV pond > column PV pond. [Conclusion] Surface PVs can help reduce the salinity of winter water bodies and maintain both the temperature of the water bodies and the content of dissolved oxygen. The above indices used for the column PV power station to improve its effect were better than those for the floating PV power station, and to a certain extent, the floating PV power station could improve eutrophic water bodies. Surface PVs can affect the structure of phytoplankton communities, and the effect of floating PVs on the phytoplankton of sunken water bodies is smaller than that of column PVs. Pearson and stepwise regression analyses revealed that the phytoplankton community diversity of column PV sunken ponds is mainly affected by water temperature (WT) and TN, while that of floating PV subsidence ponds are mainly affected by the WT. In summary, floating PV power station are more favourable for improving the water quality of subsidence ponds and have the least impact on the phytoplankton community structure.

Keywords: surface photovoltaic; mining subsidence pond; phytoplankton community structure; environment factors

随煤炭资源开采,采煤沉陷水域面积逐年增大,对其进行综合治理与绿色利用已成为资源型城市稳定转型重要途径^[1]。近年来,水面光伏电站用于采煤塌陷水域缓解了光伏发电占用大量土地资源问题,且有效利用了废弃沉陷水域资源,建设水面光伏电站更符合中国的《“十四五”可再生能源发展规划》的要求^[2-4]。采煤沉陷水域较常规水体水域生态环境具有特殊性和复杂性,而水面光伏电站铺设于沉陷塘中,可能会对沉陷塘进一步产生影响^[5-6]。目前,国内外关于水面光伏电站对水环境质量监测的研究主要集中在夏、秋季农业、水库和鱼塘等^[7-8],少有报道关于水面光伏电站对采煤沉陷水域水质变化影响的研究。浮游植物作为初级生产者,其群落结构的变化可以反映出不同时期水域水环境的变化,也会反作用于水质。一般夏季光照强度较大,气温高,可能对水环境和浮游植物群落影响较大。张万顺等^[9]对水库光伏水质进行模拟表明水面光伏会使水体富营养化略有提高。宋鑫等^[10]研究发现夏秋季水面漂浮光伏可以

抑制浮游植物过度生长,对水体富营养化有一定的抑制作用。王燕妮等^[11]研究扬中通威渔光一体电站发现夏季光伏组件会使微生物群落丰富度略有下降。实际上,光伏面板会遮挡光线,对水面光照强度影响较大^[12],冬季比夏季的光照强度小的多,光伏在冬季对水环境和浮游植物的影响很可能比夏季小。目前冬季条件下光伏电站对采煤沉陷水域水质及浮游植物群落结构影响研究还非常缺乏。因此,本研究选取淮南矿区冬季的漂浮光伏沉陷塘和立柱光伏沉陷塘为研究对象,以无光伏沉陷塘作为对照,通过分析不同光伏沉陷水域光照强度、水环境质量和浮游植物群落结构特征,探索冬季条件下水面光伏对水环境及水生态的影响,以期水面光伏应用于采煤沉陷水域提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

研究区位于淮南市西南部,地处淮南煤田南部煤

矿区沉陷水域(32°31′46″—32°40′10″N, 116°54′15″—117°01′35″E)淮南市煤矿区沉陷塘,属亚热带和暖温带过渡气候,冬季干燥寒冷,降雨量小,冬季年均气温2℃左右。该矿区煤炭开采时间超过40 a,水文资源充沛,境内河流、湖泊和水库众多。选取沉陷时间类似的李一矿立柱光伏沉陷塘、谢一矿漂浮光伏沉陷塘和谢二矿对照无光伏沉陷塘3个塘为研究对象。立柱光伏沉陷塘面积约4.3 km²,平均水深3.4 m,周边多为农田,水域较封闭,光伏板覆盖率为68.1%;立柱光伏是指光伏组件固定在桩上,上部桩超出设计洪水位一定距离,一般适合平均水深在3 m以下的水域,造价适宜,且水域可用来发展渔业,但维护较繁琐。漂浮光伏沉陷塘面积约4.5 km²,平均5.5 m,旁边堆积有煤矸石堆积,水域较封闭,光板覆盖率为71.3%;漂浮光伏是指光伏组件固定在浮体中,借助水体浮力支撑,一般适合水深深度较大的水域,造价较低,能很好适应水位变化,但浮体固定较繁琐,可能需要水中打桩;对照水域沉陷塘面积约2.9 km²,平均水深3.9 m,水域较封闭,无光伏板覆盖。光伏板铺设时间均在2017—2018年期间完成。

1.2 试验设计与样品采集

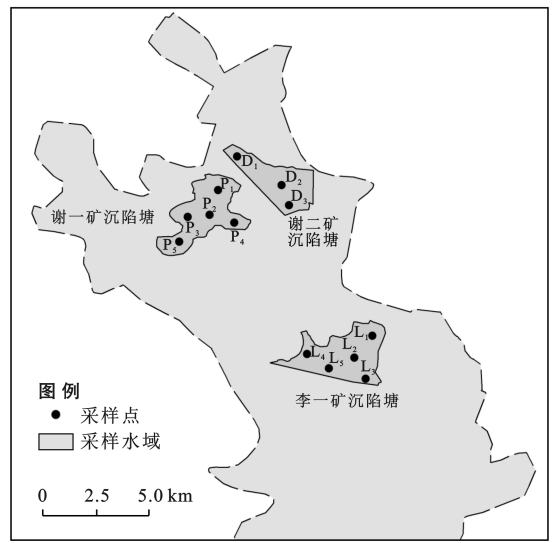
1.2.1 光照强度测定和水质因子测定

试验于2022年12月8,15,22,26日分4次进行,样点设置参照《水与废水监测第4版》如图1所示。水面光照强度测定参考Li Peidu等^[8]在研究区沉陷水域采样点光伏板边缘水平距离0.5 m处的水面与光伏板下方安装太阳能光照强度测定仪(晶合 Gemho),分别测定两处光照强度,取平均值;Global Water 便携式多功能水质测量仪测定5个样点的温度(WT)、酸碱度(pH)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)、氧化还原电位(ORP);另在采样点取混合水样500 ml,进行其他理化因子分析:氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})分别采用纳氏试剂分光光度法(HJ535—2009)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ636—2012)、钼酸铵分光光度法(GB11893—89)、重铬酸盐法(HJ828—2017)测定^[13]。

1.2.2 浮游植物采集与鉴定

浮游植物采集样点与气象因子、水质因子采样时间同步,样点一致。浮游植物采集分定性和定量采集,用25号浮游植物网在水体表面呈“∞”形来回缓慢拖动约3~5 min,将采得水样浓缩至30 ml收集至标本瓶中,加入Lugol's 碘液固定,用于浮游植物定性分析;用5.0 L采水器根据水深在上、中、下层采样进行混合,然后装入1 000 ml采集瓶,现场加入15 ml Lugol's 碘液固定,带入实验室沉淀48 h并浓缩至30 ml,用于浮游

植物定量分析。浮游植物种类鉴定和计数方法参照《中国常见淡水浮游藻类图谱》^[14]和《中国淡水藻类系统:分类及生态》^[15]。



注: D₁, D₂, D₃分别为对照无光伏沉陷塘采样点位; L₁, L₂, L₃, L₄, L₅分别为立柱光伏沉陷塘采样点位; P₁, P₂, P₃, P₄, P₅分别为漂浮光伏沉陷塘采样点位。

图1 淮南市南部煤矿区沉陷水域采样点位置示意图
Fig.1 Sampling point locations of subsidence ponds at coal mine area of Northern Huainan City

1.3 数据处理与分析

采用Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀性指数(P)和Margalef丰富度指数(M)对浮游植物群落结构进行分析评价;通过浮游植物优势种优势度(Y)确定优势种群。相关计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为第 i 种浮游植物的数量; N 为样品中浮游植物总数量; f_i 为第 i 种浮游植物出现的频率。

$$H = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \times \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

$$P = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

$$M = \frac{S-1}{\ln N} \quad (4)$$

式中: H 为多样性指数; P 为均匀性指数; M 为丰富度指数; S 为样品的浮游种类总数。当 $Y > 0.02$ 时,该物种为优势种群。

所有数据采用Excel 2016, SPSS 22进行统计分析与逐步回归分析,使用Origin 2023软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同光伏沉陷塘环境因子

2.1.1 不同光伏沉陷塘光照强度

由图2可以看出,冬季立柱和漂浮光伏沉陷塘日平均光照强度变化

呈双峰趋势,分别在 11:00 和 15:30 出现峰值,立柱光伏沉陷塘峰值为 22 507.6 和 19 766.4 lx,漂浮光伏沉陷塘峰值为 17 299.3 和 14 274.3 lx。对照塘日平均光照强度变化呈单峰趋势,日平均光照强度在 12:30 出现最大值 52 747.4 lx。立柱光伏沉陷塘的

光照强度范围 1 033.33~24 640.66 lx,漂浮光伏沉陷塘光照强度范围 990.02~18 410.1 lx,对照沉陷塘光照强度范围 2 033.5~54 612.5 lx。总体上表明,光伏沉陷塘日平均光照强度明显小于对照沉陷塘日平均光照强度,且漂浮光伏沉陷塘小于立柱光伏沉陷塘。

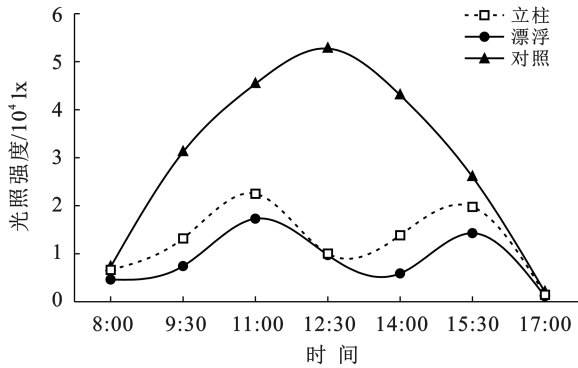
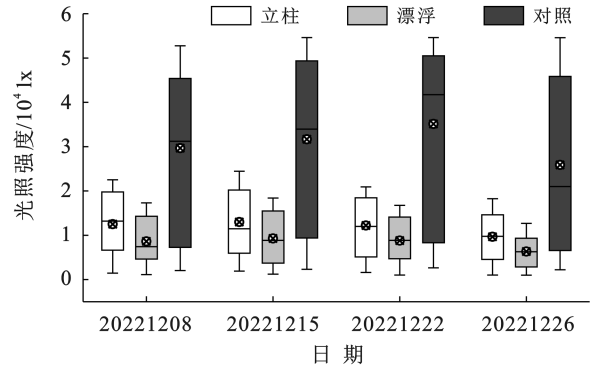


图 2 不同光伏沉陷塘平均光照强度变化

Fig.2 Variation of average light intensity in different photovoltaic subsidence ponds



2.1.2 不同光伏沉陷塘水体理化指标 不同光伏沉陷塘水质状况详见表 1。

由表 1 可知,在 3 个沉陷塘中,水体 pH 值均呈弱碱性,WT 表现为:漂浮光伏沉陷塘>立柱光伏沉陷塘>对照无光伏沉陷塘,表明光伏电站能提高水体 WT;COD_{Cr},TN 和 TP 的平均值均呈现为:立柱光伏沉陷塘>对照无光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘,最大分别达到 21.41,0.82,0.58 mg/L,最小分别达到 14.31,0.75,0.28 mg/L,表明漂浮光伏电站降低了 COD_{Cr},TN,TP 的含量;EC,TDS 和 ORP 的平均值呈

现为:对照无光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘>立柱光伏沉陷塘,最大分别达到 620.67 us/cm,309.67 mg/L 和 185 mg/L,最小分别达到 296.2 us/cm,27.4 mg/L 和 145 mg/L,表明光伏电站能一定程度降低水体盐度;DO 平均值呈现为:立柱光伏沉陷塘(9.48 mg/L)>漂浮光伏沉陷塘(7.8 mg/L)大于对照沉陷塘(7.6 mg/L),表明光伏电站对水体 DO 有一定的保持作用;而 NH₃-N 的平均值则呈现为:立柱光伏沉陷塘(0.37 mg/L)=对照无光伏沉陷塘(0.37 mg/L)>漂浮光伏沉陷塘(0.27 mg/L)。

表 1 不同光伏沉陷塘水质理化数据统计

Table 1 Statistical of water quality physical and chemical data of different photovoltaic subsidence ponds

项目	立柱			漂浮			对照		
	最小值	最大值	平均值±标准差	最小值	最大值	平均值±标准差	最小值	最大值	平均值±标准差
pH 值	8.45	8.54	8.5±0.04	8.21	8.33	8.29±0.05	8.11	8.21	8.15±0.05
WT/°C	9.3	10.4	9.82±0.44	10.8	12.3	11.56±0.64	9.3	10.1	9.67±0.40
EC/(μS·cm ⁻¹)	240	324	296.2±35.03	492	524	507.4±13.3	609	636	620.67±13.87
TDS/(mg·L ⁻¹)	112	155	127.4±17.27	235	254	241.2±7.79	302	319	309.67±8.62
DO/(mg·L ⁻¹)	9.3	9.6	9.48±0.13	7.4	8.3	7.8±0.35	7.4	7.6	7.5±0.1
ORP/MV	128	161	145±11.81	160	174	166.2±5.5	181	191	185±5.29
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	19.93	23.64	21.41±1.52	13.75	14.95	14.31±0.48	18.23	18.93	18.63±0.36
TN/(mg·L ⁻¹)	0.62	0.91	0.82±0.06	0.56	0.85	0.75±0.11	0.84	0.94	0.81±0.14
TP/(mg·L ⁻¹)	0.51	0.67	0.58±0.07	0.17	0.48	0.28±0.12	0.18	0.45	0.32±0.13
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	0.21	0.56	0.37±0.14	0.16	0.47	0.27±0.12	0.28	0.49	0.37±0.11

注:温度(WT)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)、氧化还原电位(ORP)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})。

2.2 浮游植物结构群落特征

2.2.1 浮游植物群落种类组成及优势种 浮游植物种类数量及组成如图 3 所示,调查共检出浮游植物共

6 门 64 种,立柱光伏沉陷塘浮游植物共 5 门 41 种,漂浮光伏沉陷塘浮游植物共 6 门 40 种,对照无光伏沉陷塘浮游植物 6 门共 47 种。硅藻门种类在所有沉陷

塘中最丰富,立柱光伏沉陷塘为 18 种占 44%;漂浮光伏塘 16 种占 40%、对照塘 18 种占 38%;绿藻门次之,立柱光伏塘 9 种占 22%、漂浮光伏塘 9 种占 23%、对照塘 11 种占 23%;蓝藻门立柱光伏塘 9 种占 22%、漂浮光伏塘 8 种占 20%、对照塘 9 种占 19%;再次是裸藻门,立柱光伏塘 3 种占 7%、漂浮光伏塘 4 种占 10%、对照塘 5 种占 11%;然后是隐藻门,立柱光伏塘 2 种占 5%、漂浮光伏塘 2 种占 5%和对照塘 3 种占 6%。而甲藻门只有 1 种,仅出现在漂浮光伏和对照无光伏沉陷塘,且各占 2%。由表 2 可知,立柱光伏沉陷塘优势度指数范围 0.025~0.074,漂浮光伏沉

陷塘优势度指数范围 0.021~0.082,对照无光伏沉陷塘优势度指数范围 0.023~0.091。立柱光伏塘优势种为项圈形假鱼腥藻、小环藻、平板藻、小桥弯藻、弯曲栅藻、鼓藻和裸藻;漂浮光伏塘优势种为项圈形假鱼腥藻、小颤藻、小环藻、模糊直链藻、卷曲纤维藻、弯曲栅藻、多芒藻和裸藻;对照沉陷塘优势种为赖氏泽丝藻、蜂巢席藻、针晶蓝纤维藻、变异直链藻、卵形衣藻、镰形纤维藻、多芒藻和裸甲藻。从种类上看,立柱光伏沉陷塘、漂浮光伏沉陷塘和对照无光伏沉陷塘均为硅—绿藻型,且对照沉陷塘种类数大于立柱光伏沉陷塘大于漂浮光伏沉陷塘。

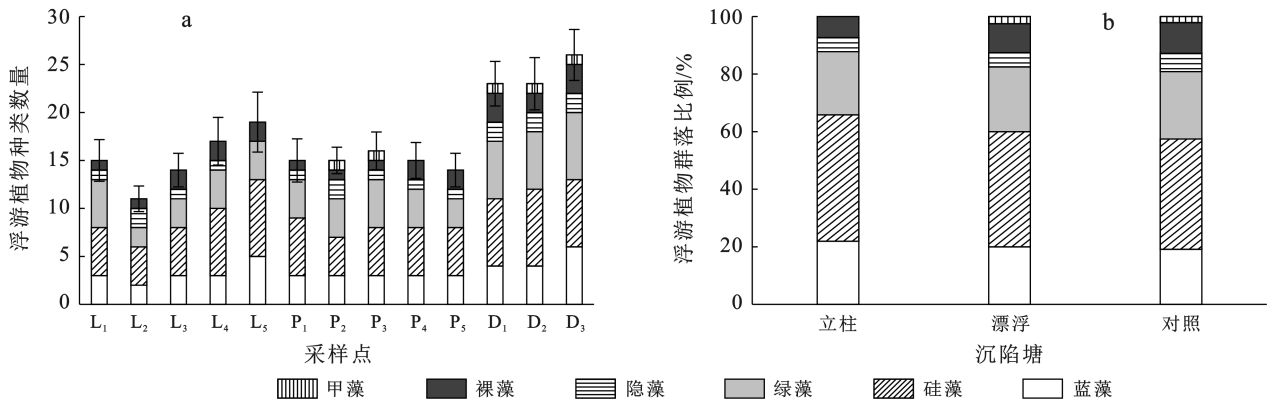


图 3 不同光伏沉陷塘浮游植物组成

Fig.3 Phytoplankton composition in different photovoltaic subsidence ponds

表 2 不同光伏沉陷塘浮游植物优势种组成

Table 2 Composition of dominant phytoplankton species in different photovoltaic subsidence ponds

门水平分类	优势种	优势度指数		
		立柱	漂浮	对照
蓝藻门(Cyanophyta)	项圈形假鱼腥藻(<i>Pseudanabaena moniliformis</i>)	0.039	0.082	—
	赖氏泽丝藻(<i>Limnithrix redekei</i>)	—	—	0.079
	蜂巢席藻(<i>Phormidium favosum</i>)	—	—	0.091
	小颤藻(<i>Oscillatoria tenuis</i>)	—	0.030	—
	针晶蓝纤维藻(<i>Dactylococcopsis raphioides</i>)	—	—	0.026
	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	0.025	0.038	—
硅藻门(Bacillariophyta)	变异直链藻(<i>Melosira varians</i>)	—	—	0.091
	模糊直链藻(<i>Melosira ambigua</i>)	—	0.021	—
	平板藻(<i>Tabellaria</i> sp.)	0.074	—	—
	小桥弯藻(<i>Cymbella laevis</i>)	0.041	—	—
绿藻门(Chlorophyta)	卵形衣藻(<i>Chlamydomonas ovalis</i>)	—	—	0.023
	卷曲纤维藻(<i>Ankistrodesmus convolutus</i>)	—	0.022	—
	弯曲栅藻(<i>Scenedesmus platydiscus</i>)	0.027	0.024	—
	镰形纤维藻(<i>Ankistrodesmus falcatus</i>)	—	—	0.051
	多芒藻(<i>Golenkinia radiata</i>)	—	—	0.036
	鼓藻(<i>Cosmarium</i> sp.)	0.026	—	—
裸藻门(Euglenophyta)	小空星藻(<i>Coelastrum microporum</i>)	—	—	0.030
	裸藻(<i>Euglena</i> sp.)	0.043	0.024	—
甲藻门(Pyrrophyta)	裸甲藻(<i>Gymnodinium aeruginasum</i>)	—	—	0.030

注:“—”表示无数据。

2.2.2 浮游植物生物量和密度 由图 4 可知,漂浮光伏沉陷塘浮游植物生物量最大,为 3.34 mg/L;对照无光伏沉陷塘浮游植物生物量次之,为 3.20 mg/L;立柱光伏沉陷塘浮游植物生物量最小,为 3.12 mg/L;其中,不同光伏沉陷塘总体上硅藻门生物量最大,立柱光伏沉陷塘为 1.35 mg/L、漂浮光伏沉陷塘为 0.98 mg/L 和对照无光伏沉陷塘为 0.89 mg/L;立柱光伏沉陷塘和对照无光伏沉陷塘裸藻门生物量最少,分别为 0.26 和 0.25 mg/L;而漂浮光伏沉陷塘隐藻门生物量最少为 0.38 mg/L。且研究区浮游植物密度在对照无光伏沉陷塘最大为 2.86×10^6 个/L(以细胞数计),立柱光伏沉陷塘次之,为 2.12×10^6 个/L;漂浮光伏沉陷塘最小,为 2.0×10^6 个/L。

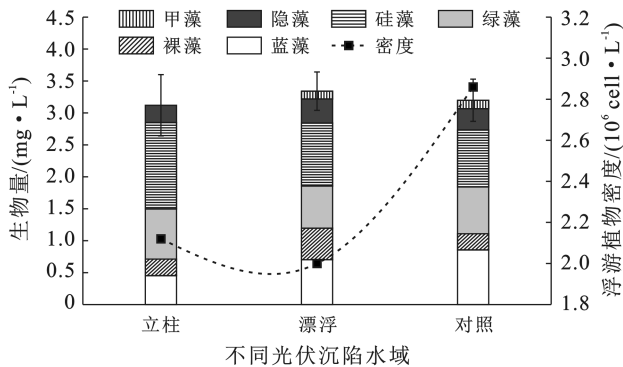


图 4 不同光伏沉陷塘浮游植物生物量和密度

Fig.4 Phytoplankton biomass and density in different photovoltaic subsidence ponds

2.2.3 浮游植物多样性指数评价 由表 3 可知,研究区立柱光伏沉陷塘浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀性指数和 Margalef 丰富度指数平均值分别为 2.50, 0.47 和 3.13;漂浮光伏沉陷塘分别为 2.53, 0.48 和 3.03;对照无光伏沉陷塘分别为 2.92, 0.52 和 4.64。这表明无光伏沉陷塘的多样性指数、均匀性指数和丰富度指数均大于光伏沉陷塘,且多样性指数和均匀性指数漂浮略微大于立柱光伏沉陷塘,丰富度指数立柱光伏沉陷塘略微大于漂浮光伏沉陷塘。通常认为多样性指数和均匀性指数值越大,浮游植物的群落结构越复杂,稳定性越高^[16]。即在无光伏沉陷塘群落结构较稳定,而在光伏沉陷塘中,漂浮光伏沉陷塘稳定性略大于立柱光伏沉陷塘。

表 3 不同光伏沉陷塘浮游植物多样性指数统计
Table 3 Statistics of phytoplankton diversity index in different photovoltaic subsidence ponds

项目	采样点编号	多样性指数(H)	均匀性指数(P)	丰富度指数(M)
立柱	L ₁	2.53	0.47	3.09
	L ₂	2.14	0.39	2.30
	L ₃	2.38	0.44	2.84
	L ₄	2.73	0.51	3.57
	L ₅	2.73	0.51	3.85
均值		2.50	0.47	3.13
漂浮	P ₁	2.59	0.49	3.04
	P ₂	2.41	0.45	3.09
	P ₃	2.59	0.49	3.28
	P ₄	2.56	0.48	2.97
	P ₅	2.51	0.47	2.78
均值		2.53	0.48	3.03
对照	D ₁	2.83	0.51	4.44
	D ₂	2.93	0.53	4.35
	D ₃	2.98	0.54	5.14
均值		2.92	0.52	4.64

2.3 浮游植物群落对水环境因子的相关性分析

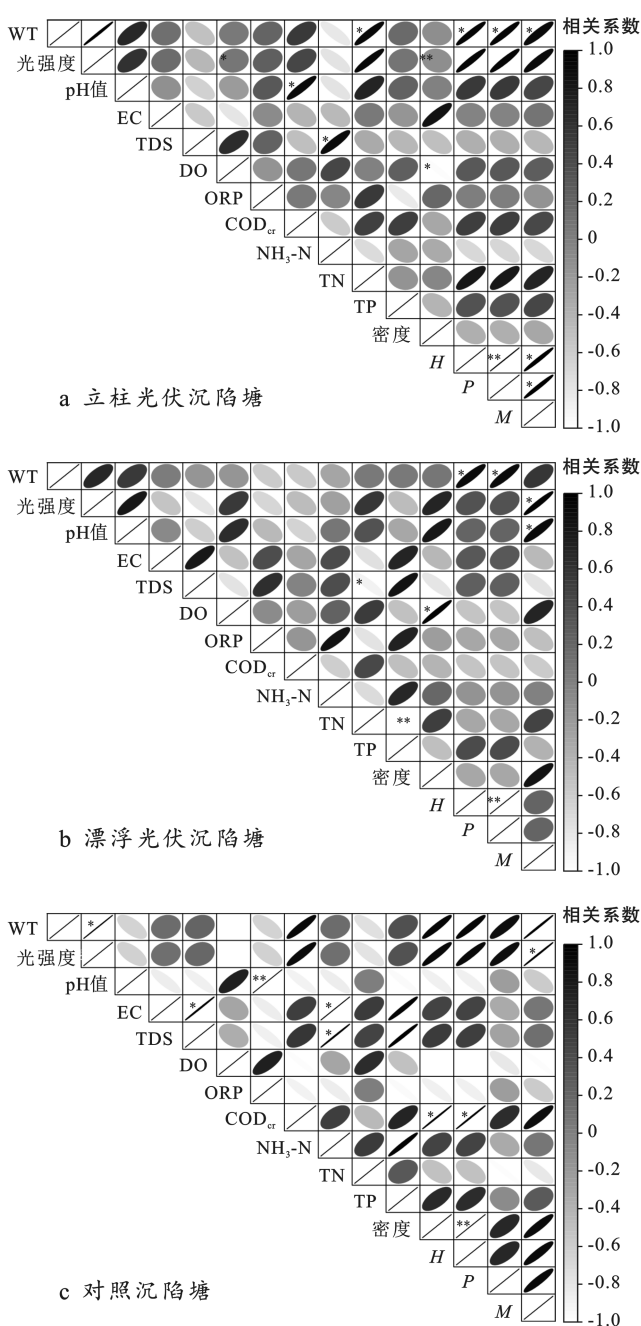
2.3.1 Pearson 相关性分析 由图 5 可以看出,立柱光伏沉陷塘浮游植物密度与 DO 呈显著负相关($p \leq 0.05$),浮游植物多样性指数(H)、均匀性指数(P)、丰富度指数(M)均与水温、光照强度呈显著正相关($p \leq 0.05$);漂浮光伏沉陷塘浮游植物密度与 DO 呈显著正相关($p \leq 0.05$),浮游植物多样性指数(H)和均匀性指数(P)与水温呈显著正相关($p \leq 0.05$);浮游植物丰富度指数(M)与光照强度、pH 值呈显著正相关($p \leq 0.05$),TN 与 TP 呈极显著负相关($p \leq 0.001$);对照沉陷水域浮游植物密度与光照强度呈显著正相关($p \leq 0.05$),多样性指数(H)和均匀性指数(P)与 COD_{Cr} 呈显著正相关($p \leq 0.05$)。即不同沉陷塘所受主要影响的环境因子有所差异。

2.3.2 多元线性逐步回归分析 由表 4 可知,采用 SPSS 22 进行多元线性逐步回归分析不同光伏沉陷塘环境因子对浮游植物多样性指数的影响作用,根据方程拟合程度、F 值与共线性诊断进行逐步回归方程模型选择。结果显示,不同光伏沉陷塘环境因子对浮游植物多样性指数影响有所差异,WT 和 TN 为立柱光伏沉陷塘主要影响因子,WT 为漂浮光伏沉陷塘主要影响因子,而对照沉陷塘主要影响因子为 COD_{Cr} 。

表 4 不同光伏沉陷塘环境因子与多样性的逐步回归分析

Table 4 Stepwise regression equation for environmental factors and diversity of different photovoltaic subsidence ponds

指数	多元线性回归方程	拟合指数(R^2)	显著性 p
立柱光伏沉陷塘多样性指数	$H = -0.18 + 0.399WT - 1.712TN$	0.997	< 0.01
漂浮光伏沉陷塘多样性指数	$H = 1.342 + 0.103WT$	0.761	< 0.05
对照沉陷塘多样性指数	$H = -1.134 + 0.222COD_{Cr}$	0.994	< 0.05



注: *, ** 分别表示在 $p \leq 0.05$ 和 $p \leq 0.001$ 水平显著相关。

图 5 不同光伏沉陷塘环境因子与浮游植物群落多样性指数相关性分析

Fig.5 Correlation analysis on relationship between environmental factors and phytoplankton community diversity index in different photovoltaic subsidence ponds

3 讨论

3.1 水质变化特征分析

光照强度结果表明,水面光伏电站的建设减弱了沉陷塘水面的光照强度,这与牛超等^[7]研究的光伏面板对中华蟹养殖水体水面光照强度的变化相同。同时,水面光伏沉陷塘光照强度呈双峰型,与 Li Peidu 等^[8]研究“渔光互补”光伏电站对水质光照强度影响

的趋势一致。此外,立柱光伏沉陷塘光照强度比漂浮光伏沉陷塘的光照强度较高,原因主要由于立柱光伏板覆盖率略低,而造成水面接受到的光照强度较大;而光伏沉陷塘的水温大于对照无光伏沉陷塘的原因主要是在冬季光伏板可以对水面起到一定的保温作用^[17]。漂浮光伏沉陷塘 TP 含量低可能是由于冬季气温较低,不适宜浮游植物生长繁殖,导致其吸收固定磷元素能力下降^[18];而立柱光伏沉陷塘 TP 含量最高可能由于该塘水体中存在的大量植物残骸分解释放出磷,除此之外该塘的 ORP 与 TP 呈显著负相关,由于 ORP 降低,使得 TP 浓度相应升高^[19];立柱光伏沉陷塘的 COD_{Cr} 最高可能由于冬季枯水期水位下降,且该塘与其他沉陷塘相比水位较低,水体相对较为浓缩,导致其含量升高。TN 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表现为立柱光伏沉陷塘大于等于非光伏沉陷塘大于漂浮光伏沉陷塘,但差异不明显。与对照沉陷塘相比,立柱和漂浮光伏沉陷塘的 EC, TDS, ORP 均偏低,分析原因主要是光伏沉陷塘覆盖的光伏面板更易阻碍表面塘气流运动,同时降低水面蒸发,减少塘表面的自然扰动^[2],从而使塘表面的悬浮物得以沉降,使得 ORP 和 TDS 等降低,且漂浮光伏比立柱光伏覆盖面积大,使得 EC, TDS, ORP 漂浮光伏沉陷塘大于立柱光伏沉陷塘。

本研究立柱光伏沉陷塘和漂浮光伏沉陷塘 DO 含量均高于对照无光伏沉陷塘,原因可能由于水体的 DO 的含量与温度以及光伏面板覆盖面积有关^[8],而光伏沉陷塘水温偏高,有利于氧气的溶解,导致 DO 增加^[20]。水体的 EC, TDS, ORP 可以反映出水体中盐离子含量, COD_{Cr} , TN, TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, DO 可以反映水体的营养状态^[21-22],由此看出立柱水面光伏电站相比于漂浮光伏电站更有助于降低水体盐度和提高 DO 含量,且均能够保持水体温度,而漂浮光伏电站在一定程度上可以改善富营养水体。

3.2 浮游植物群落结构特征与多样性分析

在本研究的所有沉陷塘采样点中,硅藻门种数占比均最大。这主要因为硅藻更容易在低温环境中生存并取得竞争优势,且冬季气温降低也会导致浮游植物种类减少^[23-24],这与贺玉晓等^[25]和杨宋琪等^[26]研究浮游植物结构在冬季硅藻门种类最多的结果一致。浮游植物的种类、生物量及其密度是反映浮游植物群落结构的重要指标^[27];而沉陷塘的浮游植物种类、密度均为对照无光伏沉陷塘最大,立柱光伏沉陷塘次之,漂浮光伏沉陷塘最小。由此,推测光伏电站可能会使浮游植物种类和密度略微降低,且漂浮光伏沉陷塘降低更明显。这可能是由于光伏电站会降低光照

强度,且漂浮光伏沉陷塘氮磷含量较低的原因。

群落物种多样性也是衡量某一区域内生物资源丰富程度的一个客观指标,主要是用于评价群落内物种组成稳定性、数量分布均匀程度与群落稳定性等^[28]。立柱与漂浮光伏沉陷塘浮游植物的多样性指数(H)、均匀性指数(P)、丰富度指数(M)均小于对照沉陷塘,且漂浮光伏沉陷塘的多样性指数(H)和均匀性指数(P)略微大于立柱光伏沉陷塘,丰富度指数立柱光伏沉陷塘略微大于漂浮光伏沉陷塘;表明对照无光伏沉陷塘浮游植物群落结构相对稳定,水生态环境较好,而光伏沉陷塘略差,且漂浮光伏对比于立柱沉陷塘,对浮游植物群落结构影响幅度更弱^[29]。

3.3 浮游植物群落结构与环境因子的关系

浮游植物能对水环境变化做出响应,光照强度、pH 值、水温、营养盐等环境因子均对浮游植物群落结构造成影响^[30]。对照无光伏沉陷塘的多样性指数、均匀性指数与 COD_{Cr} 呈显著正相关,丰富度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著正相关,这表明较高的 COD_{Cr} 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 可能与物种多样性、均匀性和丰富度的增加有关,因为 COD_{Cr} 可为浮游植物生长提供碳源, $\text{NH}_3\text{-N}$ 可能为浮游植物的生长和繁殖提供了养分来源,从而促进沉陷塘中的有机质与无机质增大,促进浮游植物生长繁殖^[31]。立柱光伏沉陷塘的多样性指数、均匀性指数与丰富度指数与 WT 和光照强度呈显著正相关,漂浮光伏沉陷塘的多样性指数、均匀性指数与 WT 呈显著正相关,而丰富度指数与光照强度和 pH 值呈显著正相关,这表明光伏沉陷塘中 WT 和光照强度是影响其浮游植物群落的主要影响因素,而漂浮光伏沉陷塘还可能与 pH 值有关;由于水温与光照强度是浮游植物生长、繁殖的必要条件,不同种类浮游植物适宜生长的水体温度不同^[32],且冬季下光伏电站使浮游植物受到光照强度减弱,且低温更适合硅藻类生长,使得对照无光伏沉陷塘与光伏沉陷塘主要影响因素不同。

逐步回归分析结果显示,立柱光伏沉陷塘主要受 WT 和 TN 影响,漂浮光伏沉陷塘浮游植物主要受 WT 影响,而对照沉陷塘主要受 COD_{Cr} 影响。表明光伏电站的建立会影响水体温度,从而使得浮游植物群落结构发生改变。而立柱光伏沉陷塘可能由于氮磷比较低,而氮、磷元素又是浮游植物种群生长繁殖所必需元素,从而使氮元素成为主要影响因素。而冬季主要以硅藻为主,硅藻能适应较高 COD_{Cr} 环境,且 COD_{Cr} 能增加水体有机颗粒营养物质,使 COD_{Cr} 成为对照无光伏沉陷塘主要影响因素。因此,加强对研究区基础水质的监测管理和浮游植物群落结构调查,可为沉陷塘水面光伏的综合利用和绿色开发提供基础参考。

4 结论

(1) 本次研究共检出立柱光伏沉陷塘浮游植物 41 种,漂浮光伏沉陷塘 40 种,对照沉陷塘 47 种,所有沉陷塘物种组成均为硅藻—绿藻型。

(2) 立柱与漂浮光伏电站均减弱了沉陷塘水面的光照强度,但能在冬季对水体起到一定保温作用,使水体 WT 升高,并且有助于降低水体 EC, TDS, ORP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 保持 DO 含量,且立柱光伏电站对水体 EC, TDS, ORP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 改善效果更好。漂浮光伏电站水体 COD_{Cr} , TN 和 TP 的含量最低,表明漂浮光伏电站对水体富营养化有一定的改善效果。

(3) 浮游植物的种类数、生物量、多样性指数、均匀性指数和丰富度指数在不同沉陷塘大小表现为:对照无光伏沉陷塘 > 漂浮光伏沉陷塘 > 立柱光伏沉陷塘,表明光伏电站的建立确实对浮游植物群落结构有一定的影响,且漂浮光伏电站的影响更小;不同沉陷塘中浮游植物群落多样性主要受不同环境影响因子影响,对照无光伏沉陷塘主要受 COD_{Cr} 影响,除此之外,立柱光伏沉陷塘浮游植物群落结构主要受 TN, WT 的作用影响,漂浮光伏沉陷塘主要受 WT 的作用影响。综合而言,漂浮光伏电站更有利于沉陷塘水质,对浮游植物群落结构影响最小。

参考文献 (References)

- [1] 胡振琪,肖武.关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考:基于生态修复视角[J].煤炭科学技术,2020,48(4):35-42.
Hu Zhenqi, Xiao Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: From aspects of ecological restoration [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4):35-42.
- [2] Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,66:815-824.
- [3] Trapani K, Millar D L, Smith H C M. Novel offshore application of photovoltaics in comparison to conventional marine renewable energy technologies [J]. Renewable Energy, 2013,50:879-888.
- [4] Sheeba K, Rao R, Jaisankar S. A study on the underwater performance of a solar photovoltaic panel [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2015,37:1505-1512.
- [5] Tina G M, Bontempo Scavo F, Merlo L, et al. Analysis of water environment on the performances of floating photovoltaic plants [J]. Renewable Energy, 2021,175:281-295.

- [6] Choi Y K. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact [J]. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 2014,8(1):75-84.
- [7] 牛超,吴立峰,庞杨洋,等.光伏板对中华绒螯蟹养殖环境和生长的影响研究[J].复旦学报(自然科学版),2021,60(2):253-261.
Niu Chao, Wu Lifeng, Pang Yangyang, et al. Research on the effect of photovoltaic panels on the water environment and growth performance of *Eriocheir sinensis* [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2021,60(2):253-261.
- [8] Li Peidu, Gao Xiaoqing, Jiang Junxia, et al. Characteristic analysis of water quality variation and fish impact study of fish-lighting complementary photovoltaic power station [J]. Energies, 2020,13(18):4822.
- [9] 张万顺,邓浪浪,彭虹,等.柳堰集水库渔光互补工程对水环境影响的数值模拟研究[J].水资源保护,2023,39(5):1-8.
Zhang Wanshun, Deng Langlang, Peng Hong, et al. Study on numerical simulation of impact of fishery-light complementary project on water environment in Liuyanji Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023,39(5):1-8.
- [10] 宋鑫,贝耀平,袁丙青,等.水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J].水资源保护,2022,38(5):204-211.
Song Xin, Bei Yaoping, Yuan Bingqing, et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City [J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):204-211.
- [11] 王燕妮,于华明,于江华.水面光伏局地生态效应观测事实分析[J].太阳能学报,2022,43(9):38-44.
Wang Yanni, Yu Huaming, Yu Jianghua. Observation of surface photovoltaic on local ecology [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2022,43(9):38-44.
- [12] 郑志伟,史方,彭建华,等.水面光伏电站对水域生态环境影响分析与对策[J].三峡生态环境监测,2018,3(4):47-50.
Zheng Zhiwei, Shi Fang, Peng Jianhua, et al. Influences and countermeasures of water surface photovoltaic power station on water ecological environment [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018,3(4):47-50.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].第4版.北京:中国环境科学出版社,2002:210-279.
Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods by the State Environmental Protection Administration Monitoring. Analysis Methods for Water and Wastewater [M]. 4th. edi. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:210-279.
- [14] 翁建中,徐恒省.中国常见淡水浮游藻类图谱[M].上海:上海科学技术出版社,2010.
Weng Jianzhong, Xu Hengsheng. Atlas of Common Freshwater Planktonic Algae in China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2010.
- [15] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
Hu Hongjun, Wei Yinxin. Chinese Freshwater Algae: Systems, Classification, and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [16] 肖玉娜,程清华,莫晓聪,等.丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2023,35(3):821-832.
Xiao Yuna, Cheng Jinghua, Mo Xiaocong, et al. Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(3):821-832.
- [17] 成珂,马晓瑶,孙琦琦.光伏温室大棚组件布置 CFD 模拟研究[J].太阳能学报,2021,42(8):159-165.
Cheng Ke, Ma Xiaoyao, Sun Qiqi. Cfd simulation study on module layout of photovoltaic greenhouse [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2021,42(8):159-165.
- [18] 盛漂,阳敏,陈文凯,等.禁捕初期太湖浮游植物的群落结构特征及其环境影响因子[J/OL].生态学杂志,2024:1-16.(2024-01-23).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240119.1404.004.html>.
- [19] 张维翔.淮南高潜水位采煤沉陷区水质特征及变化趋势[D].安徽合肥:安徽大学,2019.
Water quality characteristics and changing trends of coal mining subsidence area with high underground water in Huainan [D]. Hefei, Anhui: Anhui University, 2019.
- [20] 刘洋,安瑞志,杨号,等.西藏拉鲁湿地浮游植物群落时空分布特征及其驱动因子[J].湖泊科学,2024,36(2):403-417.
Liu Yang, An Ruizhi, Yang Hao, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and its driving factors of phytoplankton community in Lhalu Wetland, Tibet,

- China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2): 403-417.
- [21] 陈从磊, 谢毫, 陈业禹, 等. 淮南迪沟采煤沉陷区水体水质特征与评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 58-65.
- Chen Conglei, Xie Hao, Chen Yeyu, et al. Evaluation and characteristics of surface water quality of Digou coal mining subsidence area in Huainan [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(2): 58-65.
- [22] 杨浩, 李一平, 蒲亚帅, 等. 张家港市河道水质时空分布特征研究分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4064-4073.
- Yang Hao, Li Yiping, Pu Yashuai, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and the river water quality of Zhangjiagang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 4064-4073.
- [23] Zhao Gengnan, Pan Baozhu, Li Yiping, et al. Phytoplankton in the heavy sediment-laden Weihe River and its tributaries from the northern foot of the Qinling Mountains: Community structure and environmental drivers [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(8): 8359-8370.
- [24] 邢冰伟, 徐季雄, 曹玥, 等. 九寨沟国家级自然保护区长海夏季浮游植物群落结构及生态评价[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 1088-1099.
- Xing Bingwei, Xu Jixiong, Cao Yue, et al. Phytoplankton community structure and ecological evaluation in summer, Lake Changhai of Jiuzhaigou National Nature Reserve [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 1088-1099.
- [25] 贺玉晓, 刘天慧, 任玉芬, 等. 北运河秋冬季浮游植物群落结构特征及影响因子分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(5): 1710-1721.
- He Yuxiao, Liu Tianhui, Ren Yufen, et al. Characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in autumn and winter of the North Canal, Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(5): 1710-1721.
- [26] 杨宋琪, 高兴亮, 王丽娟, 等. 西北干旱区典型水库浮游植物群落结构特征及驱动因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 377-387.
- Yang Songqi, Gao Xingliang, Wang Lijuan, et al. Phytoplankton community structure and driving factors in typical reservoirs of arid region of Northwest China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 377-387.
- [27] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊: 洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 440-448.
- Wu Tianhao, Liu Jinsong, Deng Jianming, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 440-448.
- [28] 高锴, 李泽利, 赵兴华, 等. 于桥水库浮游植物群落时空动态及影响因素分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(1): 125-137.
- Gao Kai, Li Zeli, Zhao Xinghua, et al. Spatiotemporal dynamics of and influencing factors on the phytoplankton community in the Yuqiao Reservoir [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(1): 125-137.
- [29] 胡智华, 林妙丽, 李港, 等. 城市闸控河流浮游植物群落结构特征及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3631-3640.
- Hu Zhihua, Lin Miaoli, Li Gang, et al. Phytoplankton community characteristics and influencing factors of the urban gate-controlled rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3631-3640.
- [30] 巢欣, 李晓东, 杨清, 等. 雅鲁藏布江中上游浮游植物功能群季节演替特征对水环境的指示作用[J/OL]. *生态学杂志*, 2023; 1-11. (2023-11-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231120.1416.010.html>.
- Chao Xin, Li Xiaodong, Yang Qing, et al. Seasonal succession characteristics of phytoplankton functional groups in the middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River as an indicator of water environment [J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023; 1-11. (2023-11-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231120.1416.010.html>.
- [31] 李艳红, 王雪漫, 徐璐恺, 等. 鄱阳湖丰水期氮素分布特征及其对藻类的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 16-22.
- Li Yanhong, Wang Xueman, Xu Junkai, et al. Nitrogen distribution and its influence on the algae community of Poyang Lake in the wet season [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(4): 16-22.
- [32] 张辉, 彭宇琼, 邹贤妮, 等. 南亚热带特大型水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系: 以新丰江水库为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(2): 404-417.
- Zhang Hui, Peng Yuqiong, Zou Xianni, et al. The characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors of a large reservoir in subtropic of Southern China: A case study of Xinfengjiang Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(2): 404-417.