

水面光伏对水生态环境影响的研究进展

廖清发^{1,2,3}, 孙佳浩^{3,4}, 赵得荣^{1,2,3}, 陈要平^{3,4*}, 陈孝杨^{3,4}, 申礼鹏^{2,3}, 张丽娜^{3,4}, 孙宏杰^{1,2,3}

¹平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司, 安徽 淮南

²淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南

³深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南

⁴安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年1月13日; 录用日期: 2025年2月16日; 发布日期: 2025年3月5日

摘要

水面光伏作为新兴清洁能源的代表, 充分利用光能资源的同时, 减少土地占用, 备受人们关注。基于国内外水面光伏对水体生态环境影响的研究, 分析其对局地微气候、水质、水生生物及水体生态系统功能方面的影响。光伏布设导致水面粗糙度增加, 近水体表面气流会受到不同的影响, 减少水面的风切变, 降低风速和改变风向; 水面光伏改变原有的下垫面形态, 打破水面辐射平衡过程, 使局部气温在光伏区域白天增加, 晚上下降, 湿度则相反。上述变化引起局地微气候、水体的热量分布和气体交换的改变, 导致在不同环境下水温变化不一, 进一步影响水体的理化特性, 如溶解氧含量和营养盐浓度等, 从而影响到水生生物的生存和繁殖。

关键词

水面光伏, 气象要素, 环境影响, 生态功能

Research Progress on the Impact of Floating Photovoltaics on Aquatic Eco-Environment Systems

Qingfa Liao^{1,2,3}, Jiahao Sun^{3,4}, Derong Zhao^{1,2,3}, Yaoping Chen^{3,4*}, Xiaoyang Chen^{3,4}, Lipeng Shen^{2,3}, Lina Zhang^{3,4}, Hongjie Sun^{1,2,3}

¹Ping'an Coal Mining Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Huainan Anhui

²Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui

³State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan Anhui

⁴School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui

*通讯作者。

文章引用: 廖清发, 孙佳浩, 赵得荣, 陈要平, 陈孝杨, 申礼鹏, 张丽娜, 孙宏杰. 水面光伏对水生态环境影响的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(3): 239-247. DOI: 10.12677/aep.2025.153030

Abstract

As a representative of emerging clean energy, Floating photovoltaics (FPV) has attracted much attention for fully utilizing light energy resources and reducing land occupation. Based on domestic and international studies of the FPV on the ecological environment of water bodies, the effects of local microclimate, water quality, aquatic organisms and water ecosystem functions were analyzed. The layout of photovoltaic increases the roughness of the water surface, which affects the airflow near the water. This difference results in less wind shear over the water, resulting in lower wind speeds and different wind directions. In addition, surface photovoltaic also changed the original underlying surface morphology, breaking the radiation balance of the water surface, thereby changing the local microclimate. Specifically, the local air temperature in FPV area increases during the day and decreases at night, while the humidity shows the opposite trend. These changes affect the heat distribution and gas exchange of the water body, leading to different water temperature changes in varying environments. And the physicochemical properties such as dissolved oxygen content and nutrient concentration are further affected, ultimately affecting the survival and reproduction of aquatic organisms.

Keywords

Floating Photovoltaic, Meteorological Element, Environmental Impact, Ecological Function

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化的加剧，为减少对环境的影响并实现可持续发展，世界各地正在积极推动可再生能源的利用。水面光伏作为一种新兴的清洁能源，与传统的陆地光伏相比，不仅能够有效缓解土地资源紧缺的问题，还能利用水体的自然冷却效应提升光伏板的发电效率，特别是在采煤塌陷水体、水库等封闭或半封闭水域展现广阔的应用前景，逐渐成为能源领域的研究热点[1]。

世界上首个水面光伏项目，由日本爱知县的国家先进工业科学技术研究所团队于 2007 年安装，旨在比较水冷和风冷条件下的发电效率[2]。据统计，目前全球已有 60 多个国家部署水面光伏，其中较大规模的项目主要集中在亚洲。预计到 2030 年，全球水面光伏的总容量将增加至 10~30 GW [3]。其中，中国凭借丰富的水资源和广泛的应用场景，为水面光伏的快速发展提供巨大的潜在空间。已有资料表明，中国已成为世界上水面光伏安装量最大的国家，在 2019 年已占世界总装机容量的 75% [4]。未来，中国的水面光伏的潜在装机容量可达 705.2 GW 至 862.6 GW，年发电量可达 1164.9 TWh 至 1423.8 TWh [5]。

水面光伏还能减少水体蒸发。在中国的干旱和半干旱地区，平原水库上安装光伏组件可以有效抑制水面蒸发，从而相当于增加蓄水量。其有助于防止水中盐分浓缩，降低水体的矿化度，改善水质，同时也减轻下游灌溉区的土壤盐渍化程度[6]。然而，随着水面光伏的快速发展，其对水体生态环境的影响也引发广泛关注。目前，相关研究主要集中在水面光伏对水温、溶解氧、叶绿素和浮游动植物等环境因子的影响，关于其对局地微气候，尚无一致结论。基于文献分析，探讨水面光伏对水体的综合影响，包括

微气候、物理和化学特性，以及水生生物等(图 1)。

2. 水面光伏

2.1. 结构

水面光伏是一种利用漂浮技术在水体上安装光伏组件发电的系统。光伏组件阵列放置在浮体上，通常使用锚固系统稳定在水体上，比如水库、河流、采煤塌陷水体等[7]。水面光伏由浮体、锚固系统、太阳能板和电缆等组成，并且太阳能电池板布置成阵列，在阵列之间存在一定用来维护的间隔(图 1) [8]。

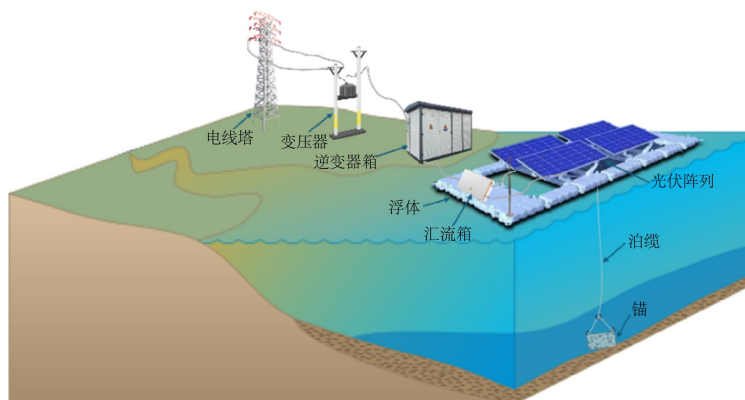


Figure 1. Floating photovoltaic structure

图 1. 水面光伏结构

2.2. 原理及优势

水面光伏的原理是通过在水体上部署太阳能光伏板，其表面的光敏材料吸收太阳辐射，将光能转化为电能，产生电子-空穴对，通过电流传输来实现光电转换。光伏电池板上的电流通过电路输送到发电系统中，供给电网或用于充电储存。

在高温环境下，光伏电池的发电效率会因温度升高而下降，而水面光伏可以通过水的冷却作用，有效降低光伏电池的温度，提高发电效率，从而获得更多的清洁电能[1]。随着全球人口的增加和城市化进程的加快，土地资源变得越来越宝贵。水面光伏不占用陆地资源，为解决土地资源短缺问题提供一种新的选择[9]。此外，水上光伏电站还可以协调运行和稳定公用事业规模的光伏发电量[10]。

3. 水面光伏对局部气象要素的影响

目前，关于水面光伏对局地气候影响的研究尺度主要来自于现场观测和模型模拟及其验证。水面光伏能够有效影响水面辐射强度、反照率和下垫面参数特征，进而对能量传递过程产生影响，导致风速和风向、太阳辐射和空气温湿度等气象要素发生变化(表 1)。

3.1. 风速和风向

水面光伏本身可能会在水面上形成遮挡，改变水面的风速分布情况，使得风速发生局部变化。由于常值通量的特性，如在中性层结条件下，近水面层中的风速、温度等廓线都有其特有的规律(风速遵循对数律) [16]；同时近水面粗糙度是对数风速廓线的重要参量，反映出风速与下垫面形态结构的关系[17]。光伏区域的表面粗糙度与其在开放区域的水面相比，因光伏组件模块高度不同而不同，近表面气流可能会受到不同的影响，减少水面的风切变，从而影响风速与风向[14]。研究表明，某地风速模式与水面光伏

Table 1. Potential impacts of floating photovoltaics on meteorological elements
表 1. 水面光伏对气象要素的潜在影响

国家	研究尺度	气象要素效应	参考文献
德国	现场观测	风速平均降低 23%，太阳辐射平均降 73%。	[11]
中国	现场观测	风流过光伏阵列时，倾斜的光伏面板抵抗风速，改变气流方向，重新分布风型。	[12]
中国	现场观测	光伏阵列对空气温度有加热作用。	[13]
德国	模型模拟	水面光伏的部署降低湖面的净风速和太阳辐射，降幅取决于光伏覆盖率。	[14]
中国	模型模拟	风速降低 70%，白天气温升高(平均+2.01℃)，夜间下降(平均-1.27℃)，相对湿度的趋势相反(-3.72%, +14.43%)。	[15]

的场地一致(在微气象尺度上，水面光伏场地的风速模式与湍流阻力一致，类似于埃克曼层)，并且随着高度的降低，风速在不同高度之间衰减。光伏面板安装的高度也会对风速产生影响，主要是表现在光伏面板高度以下的气流被阻挡，导致气流方向改变，速度降低[12]。在水面上建设水面光伏能够影响气压梯度力，在水面光伏区域和开放区域形成压力差，改变气流方向，压力差越大，风速就越大。殷代英等[18]研究表明，布设光伏后，风向由原来的东北风转为以东风为主，光伏的布设使得局地风向更加单一。Ilgen 等[11]在德国莱茵河上安装光伏，通过气象测量近水表侧风流，在光伏设施下，模块处的近水表风速平均降低 23%。

3.2. 太阳辐射

当太阳辐射穿过地球大气层到达水面，一部分被水体直接吸收，一部分反射到大气层中，剩余部分以感热和潜热形式重新辐射[19]。太阳辐射到达水面光伏，传入的辐射能量主要由浮动覆盖物拦截吸收，吸收的热量可以传递到与浮盖接触的水体，或者作为发射的长波辐射和感通热量返回到大气[20]。光伏板吸收阳光后会产生热量，光伏组件通常会采取一定的散热措施，如通过水冷系统或自然对流来降低光伏板的温度。这可能在一定程度上影响周围水体的温度，并进一步影响局地的微气候。光伏电板把太阳能转换成电能，减少太阳对水面的直接辐射，对水面辐射平衡和局地空气温湿度等产生一定影响[18] [21]。Aminzadeh 等[22]研究表明随着光伏覆盖面积的增加，浮动元件上拦截的辐射能量增加，其潜在的升温可能会增加横向水间隙的热通量，从而有助于增强来自未覆盖水面部分的蒸汽通量。

3.3. 空气温湿度

水面光伏对于不同气候条件和下垫面造成的影响各异，因此光伏区域与开放区域的温度和相对湿度对光伏产生的影响各不相同。光伏布设完成后，改变水面原有的下垫面条件，打破原有的水表辐射平衡过程，形成局部微气候并作用于周边的环境。光伏区域与开放区域引起的感热和潜热形式有所不同，导致两者能量变化有所差异，从而引起增加空气温度和降低空气湿度的效应。研究表明，光伏区域的空气温度在白天较周边区域高，会形成“光伏热岛效应” [23]；在晚上较周边区域低，具有“冷却机制” [24]。Liu 等[15]得出，在光伏区域白天气温升高(平均+2.01℃)，夜间下降(平均-1.27℃)，相对湿度的趋势相反 (-3.72%, +14.43%)。

4. 水面光伏对水体环境生态系统的影响

4.1. 水体物理性质

太阳辐射是导致水分蒸发的主要因素，光伏板的遮蔽作用有效降低了水面暴露在阳光下的时间和强

度,进而减少了水分蒸发[25]。水体的蒸发通常伴随着水温升高。水面光伏板的遮挡作用可以有效降低水面温度的波动,避免太阳强烈照射下水温快速升高。温度的稳定性可以减少蒸发速率,因为水温较低时,水分蒸发的速度较慢。光伏板的结构能够部分阻挡风的流动,从而减少水面附近的风速。根据道尔顿蒸发定律知,风速是影响水体蒸发的重要因素,高风速可以加速水体表面的蒸发,而光伏板形成的空气屏障有助于降低风速,进一步减少蒸发。在水体蒸发的过程中,水分逐渐被蒸发走,而溶解在水中的盐分却被留下,导致盐度增加。通过减少蒸发,水面光伏可以减少盐分积累的速度,有助于保持水体盐度的相对稳定,尤其是在干旱季节或蒸发量较大的时期。减少蒸发能够帮助保持水体的水量稳定,从而避免因蒸发过多而导致的水体盐度和浓度变化。特别是在盐碱地区,水分的减少可能使水体盐度升高,影响水生生态系统的健康。研究发现,人工覆盖物往往比自然覆盖物更能减少到达水体的太阳辐射,这是由于它们通常用于覆盖整个水体表面,并且拥有较低的透明度,比如,悬挂的遮阳布覆盖物能使光透射率降低 99%,而冰盖则可使透射率降低 53%~82% [26] [27]。

水面光伏系统通过覆盖水面来影响太阳辐射的吸收与反射。传统情况下,太阳辐射直接照射到水面,水体会吸收一定量的热量并通过蒸发、对流等方式散发热量。然而,当光伏板安装在水面上时,部分太阳辐射被光伏面板吸收并转化为电能,剩余的辐射被反射或透过光伏面板照射到水面。光伏面板的覆盖减少了水体直接暴露于太阳辐射的时间,减少了水体的加热过程。因此,在相同的气候条件下,水面光伏能够在一定程度上降低水面温度。水面光伏的存在影响了水体表面的热交换过程。水体的热量主要通过辐射、对流和蒸发三种方式与环境交换。当水面被光伏板覆盖时,水体的蒸发作用受到一定抑制。因为光伏面板会减少水面与大气之间的接触面积,从而减少水分的蒸发速率。蒸发不仅是水体降温的一个重要机制,而且还在水体与大气之间传递了大量的潜热。由于蒸发的减少,水面温度可能会逐渐升高,尤其在光伏系统较为密集的区域。此外,光伏板表面与水体之间的温差也会影响热量的传递效率。如果光伏板表面温度较高,可能会将热量传递给水体,进一步影响水温。水面光伏系统通过改变水体的热辐射特性进一步影响水温。水面通常会吸收并重新辐射太阳辐射产生的热量,而光伏面板的覆盖会改变这一过程。光伏板本身对热量的吸收和辐射特性与水体不同,通常其辐射率较低,可能会导致水体表面热量的散失变得更加困难。这意味着,水体的热辐射能力被部分削弱,热量积累的速度可能会加快。从能量平衡的角度来看,水面光伏系统在一定程度上改变了水体的热量输入和输出过程。光伏板减少了太阳辐射的直接照射,改变了水体的热量吸收过程,但同时,光伏板本身可能会吸收一部分热量并辐射到水面。加上光伏面板覆盖后蒸发减少,水体的热量积累情况变得更加复杂[15]。水面光伏对水温的影响将随入射太阳辐射而变化,太阳辐射可以根据位置在昼夜和季节尺度上动态波动[28]。王燕妮等[29]发现,水面光伏在水体表面形成阴影,阻挡太阳辐射的入射,导致水温降低。一天之中,正午太阳高度角最大时,太阳辐照度最大,水温较其他时间段较高。

4.2. 水体化学性质

水面光伏在水面覆盖一定范围后,会影响到光线透入水下的程度,从而影响水体中藻类的光合作用,进而影响水中的溶解氧含量。一方面,光伏面板覆盖水面后,会减少水中光线的穿透深度,影响水草和浮游植物等水生植物的光合作用效率,导致水中溶解氧含量减少。尤其是在夏季高温季节,水体中的溶解氧含量本就容易下降[30]。水面光伏覆盖的增加可能进一步加剧溶解氧不足,初级生产力下降,对水生生物的生存环境造成危害[31]。另一方面,水面光伏在运行过程中也会产生一定的余热,导致水体温度升高[32]。高温水体溶解氧含量通常较低,而且水体温度升高会加速水体中氧气的消耗速度,也会影响水中的溶解氧含量。随着时间的推移,有氧过程不断消耗有限的氧气供应,氧气消耗增加。溶解氧的缺乏可能对水质产生多种影响,包括从床沉积物中释放营养物质和污染物[33]。Yang 等[4]通过结合随机和连续

的现场采样, 调查浮动光伏系统对 Tengeh 和 Poyan 水库的影响。实地研究表明, 在光伏板覆盖的水面, 溶解氧平均降低约 2 mg/L。

氮元素在地球生态系统以多种形式存在, 在水体中主要为无机氮和有机氮, 并通过硝化和反硝化等过程进行转化[34]。水体中氮循环过程主要受到生物因素(如藻类)和非生物因素(如溶解氧)的影响。水面光伏降低水体表面温度, 抑制藻类和微生物的生长, 从而影响氮的生物转化。水面光伏通过减少水温波动可能影响水中的溶解氧水平, 系统内氧气充足的条件下, 硝化细菌发生硝化作用消耗氧气, 产生硝酸盐[35]。系统内的氧气供应不足, 会导致水体缺氧, 并促进反硝化作用的发生, 将硝酸盐还原为气态氮, 降低水体富营养化的风险, 改善水质[28]。光伏的建设和运行可能会导致一定量的废水排放, 其中可能有含氮化合物, 对水体氮的浓度造成一定的影响。Yang [4]等采用三维水动力生态湖泊模型, 结合实地测量和采样, 研究水面光伏对新加坡热带浅水水库水动力和水质的影响, 该预测结果表明, 太阳能板覆盖区域总氮将增加 10%。

水面光伏覆盖水面, 形成遮光条件下导致溶解氧水平较低, 这导致藻类分解释放水中的正磷酸盐[36]。水面光伏的设施也可能改变水体的流动方式和水质分布, 进而影响水中颗粒物和磷的沉降速率, 使得磷在水体中的分布不均匀, 加剧水体中磷的累积问题。Al-Widyan [36]等在实验中使用三个外表涂成黑色的聚乙烯水箱, 其装有相同体积人工湖水, 设置三个覆盖率, 分别为 0%, 30%和 50%。研究发现磷酸盐从约 20.0 mg/L 开始, 0%和 30%覆盖在前两个月显著下降, 分别下降到 5.0 mg/L 和 6.67 mg/L, 直到实验结束保持不变。对于 50%覆盖, 前两个月磷酸盐水平略微下降至 17.67 mg/L, 然后又增加至 22.33 mg/L。试验期间对照组和 30%覆盖磷酸盐值减少, 而 50%覆盖磷酸盐的值没有太大改变。

4.3. 水生生物

光伏板在水面上的覆盖会限制阳光的进入, 并可能防止有毒藻华的发展[37]。然而, 过多的遮蔽可能会杀死浮游初级生产者(如微藻), 导致局部水体中藻类的光合作用受到一定程度的影响和水中叶绿素含量的下降, 从而影响水中植物的正常生长和养分循环, 对水生生态系统产生负面影响。Haas 等[38]用三维数值水动力水质模型, 对光伏区域与非光伏区域情况进行比较。通过监测叶绿素 a 总量作为生物量的替代指标来监测微藻的生长, 评估水面光伏覆盖率对水质的影响, 覆盖 0~40%时在防止水华方面收效甚微, 覆盖 60%~100%时完全消除藻类, 但这可能威胁湖泊的生态。当覆盖 40%~60%时, 可以有效避免藻类产生水华。

浮游植物进行光合作用, 利用二氧化碳和阳光合成有机物质, 并为水生动物提供养分。它们能够为水中其他生物提供食物, 构成食物链中的重要一环, 同时进行光合作用, 并释放出氧气, 有助于增加水中氧气含量, 改善水质环境[39]。水体中富含养分, 极易导致浮游植物过度生长, 形成水华[40]。浮游植物的种群密度和组成会受到水体温度、光照辐射、氧气含量等环境因素的影响而发生变化。水面光伏将直接减少在阵列结构下以及混合深度下的光合有效辐射, 因此表水层深度与真光层深度的比率将会改变, 从而影响浮游植物生长[41]。杨华音等[42]在 2022 年 7~9 月太湖蓝藻的爆发期, 利用路基高光谱近感监测仪高清视频, 对蓝藻群体水面漂浮进行高频昼夜连续观测, 结合同步高频气象数据, 科学量化典型气象因子对蓝藻群体的野外原位垂直迁移, 发现风速和太阳辐照度与蓝藻群体漂浮发生概率呈显著负相关。

鱼类常常需要根据季节和生命周期在水体中进行迁徙和产卵, 水面光伏的建设可能会阻碍鱼类的正常活动, 使其难以进行栖息和繁衍, 还可能对水质产生影响, 进而影响鱼类的生存[43]。水面光伏在运行过程中可能会释放一些化学物质或热量, 使水体温度升高, 高温和化学物质的释放可能导致水中氧气含量下降、水体富营养化等问题, 进一步影响鱼类的生存[44]。水面光伏为鱼类形成遮蔽场所, 防止鱼类被其他生物(如鸟类)捕食[45]; 其在水面上的光影可能会改变水体中的光照强度和方向, 从而影响水中浮

游生物的分布和数量,使鱼类的觅食受到一定影响[46]。Château 等[47]建立一个具有水面光伏覆盖的养殖鱼塘的数学模型,模拟结果表明,水面光伏可能对鱼类的生长产生一定的负面影响,但在光伏面板覆盖为 60%时,鱼产量仍可保持 70%左右,这使发电和渔业生产之间有一个非常有益的权衡。

5. 结论与展望

随着双碳目标的推行,可再生能源正迅速发展,水面光伏作为未来清洁能源发展的重要方向,也引起广泛关注。然而,水面光伏对水环境系统的影响不可忽视,主要表现在改变风速和风向、太阳辐射以及空气温湿度等气象因素,从而影响水环境的物理、化学和生物方面的特征。主要结论如下:

(1) 水面光伏的安装增加水面粗糙度,并与开放水域形成压力差,导致风速和风向的变化。另一方面,水面光伏的布设,导致下垫面形态改变,引起感热和潜热变化,从而使局部气温在光伏区域白天增加,晚上下降,湿度则相反。

(2) 光伏面板阻挡光线进入水体,减少太阳辐射,限制初级生产者的光合能力和溶解氧的产生,进而影响氮和磷等营养盐的循环。

(3) 水面光伏引起的光照降低会导致藻类生长的减少,对光依赖的生物群落结构可能发生改变。光伏提供的阴影区域为鱼类提供遮蔽场所,防止鱼类被其他生物捕食。

为最大限度地减少对水生态环境的影响,需要在水面光伏的建设和运行过程中加强监测与管理,保护水体系统的健康和生态平衡。未来,通过持续的科学研究和技术创新,有望更好地解决水面光伏对水体生态系统的影响,推动清洁能源的健康发展。

基金项目

平安煤炭开采工程技术有限公司有限责任公司资助项目(HNKY-PG-JS-2023-228);安徽省留学人员创新项目择优资助计划重点项目(2018-06)。

参考文献

- [1] Bin Wan Abdullah, W.A.F., Ping, C.S., Binti Radzuan, R.N. and Binti Mokhtar, A.S.N. (2021) The Improvement on the Efficiency of Photovoltaic Module Using Water Cooling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **721**, Article ID: 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/721/1/012001>
- [2] Kurokawa, K., Itoh, A., Tatebe, S., Sakurai, T. and Ueda, Y. (2008) Performance Analysis of PV Systems on the Water. <https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Analysis-of-PV-Systems-on-the-Water-Kurokawa-Itoh/45e3b8f29a6eaaa903ee0ca616dbff12f7688864>
- [3] Shi, W., Yan, C., Ren, Z., Yuan, Z., Liu, Y., Zheng, S., *et al.* (2023) Review on the Development of Marine Floating Photovoltaic Systems. *Ocean Engineering*, **286**, Article ID: 115560. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115560>
- [4] Yang, P., Chua, L.H.C., Irvine, K.N., Nguyen, M.T. and Low, E. (2022) Impacts of a Floating Photovoltaic System on Temperature and Water Quality in a Shallow Tropical Reservoir. *Limnology*, **23**, 441-454. <https://doi.org/10.1007/s10201-022-00698-y>
- [5] Bai, B., Xiong, S., Ma, X. and Liao, X. (2024) Assessment of Floating Solar Photovoltaic Potential in China. *Renewable Energy*, **220**, Article ID: 119572. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119572>
- [6] 胡洪浩, 侍克斌, 毛海涛, 等. 水上光伏电站现状及“一带一路”干旱区新模式[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 122-127, 131.
- [7] Sahu, A., Yadav, N. and Sudhakar, K. (2016) Floating Photovoltaic Power Plant: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **66**, 815-824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>
- [8] Kumar, M., Mohammed Niyaz, H. and Gupta, R. (2021) Challenges and Opportunities Towards the Development of Floating Photovoltaic Systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **233**, Article ID: 111408. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111408>
- [9] Kougiass, I., Bódis, K., Jäger-Waldau, A., Moner-Girona, M., Monforti-Ferrario, F., Ossenbrink, H., *et al.* (2016) The Potential of Water Infrastructure to Accommodate Solar PV Systems in Mediterranean Islands. *Solar Energy*, **136**, 174-

182. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.003>
- [10] Wang, X., Virguez, E., Xiao, W., Mei, Y., Patiño-Echeverri, D. and Wang, H. (2019) Clustering and Dispatching Hydro, Wind, and Photovoltaic Power Resources with Multiobjective Optimization of Power Generation Fluctuations: A Case Study in Southwestern China. *Energy*, **189**, Article ID: 116250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116250>
- [11] Ilgen, K., Schindler, D., Wieland, S. and Lange, J. (2023) The Impact of Floating Photovoltaic Power Plants on Lake Water Temperature and Stratification. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 7932. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34751-2>
- [12] Li, P., Gao, X., Li, Z., Ye, T. and Zhou, X. (2022) Effects of Fishery Complementary Photovoltaic Power Plant on Near-Surface Meteorology and Energy Balance. *Renewable Energy*, **187**, 698-709. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.118>
- [13] Li, P., Gao, X., Li, Z. and Zhou, X. (2022) Physical Analysis of the Environmental Impacts of Fishery Complementary Photovoltaic Power Plant. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 46108-46117. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18930-8>
- [14] Exley, G., Armstrong, A., Page, T. and Jones, I.D. (2021) Floating Photovoltaics Could Mitigate Climate Change Impacts on Water Body Temperature and Stratification. *Solar Energy*, **219**, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>
- [15] Liu, Z., Ma, C., Yang, Y., Li, X., Gou, H. and Folkard, A.M. (2024) Water Temperature and Energy Balance of Floating Photovoltaic Construction Water Area—Field Study and Modelling. *Journal of Environmental Management*, **365**, Article ID: 121494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121494>
- [16] 李建华. 环境科学与工程技术辞典(修订版上)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 359.
- [17] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [18] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 15-21.
- [19] Zagury, F. and Goutail, F. (2003) Spectral Analysis of Extinguished Sunlight. *New Astronomy*, **8**, 537-548. [https://doi.org/10.1016/s1384-1076\(03\)00047-2](https://doi.org/10.1016/s1384-1076(03)00047-2)
- [20] Aminzadeh, M., Lehmann, P. and Or, D. (2018) Evaporation Suppression and Energy Balance of Water Reservoirs Covered with Self-Assembling Floating Elements. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 4015-4032. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4015-2018>
- [21] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 191-196.
- [22] Aminzadeh, M. and Or, D. (2017) Pore-scale Study of Thermal Fields during Evaporation from Drying Porous Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **104**, 1189-1201. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.039>
- [23] Barron-Gafford, G.A., Minor, R.L., Allen, N.A., Cronin, A.D., Brooks, A.E. and Pavao-Zuckerman, M.A. (2016) The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- [24] Sato, K., Sinha, S. and Kumar, B. (2009) Self Cooling Mechanism in Photovoltaic Cells and Its Impact on Heat Island Effect from Very Large Scale PV Systems in Deserts. *Journal of Arid Land Studies*, **19**, 5-8.
- [25] Yilmaz, O.S., Ateş, A.M. and Gülgen, F. (2023) A Novel Approach Suggestion for Assessing the Impact of Topographic Shading on the Estimation of the Floating Photovoltaic Technical Potential. *Energy*, **283**, Article ID: 128479. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128479>
- [26] Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B. and Pittaway, P. (2011) Effects of a Suspended Shade Cloth Cover on Water Quality of an Agricultural Reservoir for Irrigation. *Agricultural Water Management*, **100**, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.020>
- [27] Lenard, T. and Wojciechowska, W. (2013) Phytoplankton Diversity and Biomass during Winter with and without Ice Cover in the Con-Text of Climate Change. *Polish Journal of Ecology*, **61**, 739-748.
- [28] Exley, G., Hernandez, R.R., Page, T., Chipps, M., Gambro, S., Hersey, M., *et al.* (2021) Scientific and Stakeholder Evidence-Based Assessment: Ecosystem Response to Floating Solar Photovoltaics and Implications for Sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **152**, Article ID: 111639. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111639>
- [29] 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.
- [30] 石强. 黄海溶解氧含量场季节循环时空模态与机制[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(1): 1-14.
- [31] Karpouzoglou, T., Vlaswinkel, B. and van der Molen, J. (2020) Effects of Large-Scale Floating (Solar Photovoltaic) Platforms on Hydrodynamics and Primary Production in a Coastal Sea from a Water Column Model. *Ocean Science*, **16**, 195-208. <https://doi.org/10.5194/os-16-195-2020>
- [32] Taboada, M.E., Cáceres, L., Graber, T.A., Galleguillos, H.R., Cabeza, L.F. and Rojas, R. (2017) Solar Water Heating System and Photovoltaic Floating Cover to Reduce Evaporation: Experimental Results and Modeling. *Renewable Energy*,

- 105, 601-615. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.094>
- [33] Hupfer, M. and Lewandowski, J. (2008) Oxygen Controls the Phosphorus Release from Lake Sediments—A Long-lasting Paradigm in Limnology. *International Review of Hydrobiology*, **93**, 415-432. <https://doi.org/10.1002/iroh.200711054>
- [34] 包文雄. 窖水中氮转化关键环节及其微生物学机制[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [35] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.
- [36] Al-Widyan, M., Khasawneh, M. and Abu-Dalo, M. (2021) Potential of Floating Photovoltaic Technology and Their Effects on Energy Output, Water Quality and Supply in Jordan. *Energies*, **14**, Article 8417. <https://doi.org/10.3390/en14248417>
- [37] 周起超, 宋立荣, 李林. 遮光对滇池春季藻类水华的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9): 53-59.
- [38] Haas, J., Khalighi, J., de la Fuente, A., Gerbersdorf, S.U., Nowak, W. and Chen, P. (2020) Floating Photovoltaic Plants: Ecological Impacts versus Hydropower Operation Flexibility. *Energy Conversion and Management*, **206**, Article ID: 112414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>
- [39] Chang, Y., Ku, C. and Yeh, N. (2014) Solar Powered Artificial Floating Island for Landscape Ecology and Water Quality Improvement. *Ecological Engineering*, **69**, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.015>
- [40] 韩君, 赵亮, 魏皓. 近岸海域浮游植物水华动力机制研究进展和展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(4): 527-532.
- [41] Huisman, J., van Oostveen, P. and Weissing, F.J. (1999) Critical Depth and Critical Turbulence: Two Different Mechanisms for the Development of Phytoplankton Blooms. *Limnology and Oceanography*, **44**, 1781-1787. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.7.1781>
- [42] 杨华音, 张运林, 李娜, 等. 风速与太阳辐照度对蓝藻群体垂直迁移的复合影响[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1401-1411.
- [43] Nobre, R., Boulêtreau, S., Colas, F., Azemar, F., Tudesque, L., Parthuisot, N., *et al.* (2023) Potential Ecological Impacts of Floating Photovoltaics on Lake Biodiversity and Ecosystem Functioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **188**, Article ID: 113852. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113852>
- [44] Farmer, T.M., Marschall, E.A., Dabrowski, K. and Ludsins, S.A. (2015) Short Winters Threaten Temperate Fish Populations. *Nature Communications*, **6**, Article 7724. <https://doi.org/10.1038/ncomms8724>
- [45] Pringle, A.M., Handler, R.M. and Pearce, J.M. (2017) Aquavoltaics: Synergies for Dual Use of Water Area for Solar Photovoltaic Electricity Generation and Aquaculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **80**, 572-584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.191>
- [46] 陈坤全, 李启升, 韩燕青, 等. 鲫(*Carassius auratus*)对浅水湖泊水体浊度、营养水平和浮游生物生物量的影响——基于中宇宙模拟实验[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 397-404.
- [47] Château, P., Wunderlich, R.F., Wang, T., Lai, H., Chen, C. and Chang, F. (2019) Mathematical Modeling Suggests High Potential for the Deployment of Floating Photovoltaic on Fish Ponds. *Science of The Total Environment*, **687**, 654-666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.420>