

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.001

柳堰集水库渔光互补工程对水环境影响的数值模拟研究

张万顺^{1,2,3}, 邓浪浪¹, 彭虹⁴, 刘馨¹, 蒋安娜¹, 周奉¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学中国发展战略与规划研究院, 湖北 武汉 430072; 4. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对渔光互补工程对水环境的影响缺乏精准量化研究的问题,构建了适用于柳堰集水库的水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型,模拟了2020年8月自然现状和渔光互补工程实施后库区水温、化学需氧量、溶解氧、总磷、总氮、叶绿素a的质量浓度时空分布,并计算了水体富营养化指数。结果表明:渔光互补工程实施后,柳堰集水库的水温、溶解氧和叶绿素a质量浓度分别下降了0~6℃、0~0.02 mg/L和0~0.0005 mg/L,化学需氧量质量浓度上升了0~10 mg/L;总磷、总氮质量浓度变化趋势在光伏板下伏水域和未布设光伏板水域呈现较大差异性,光伏板下伏水域总磷质量浓度升高了0~0.814 mg/L,总氮质量浓度降低了0~0.125 mg/L;各水质指标在渔光互补工程实施前后的差异随时间推移逐渐减小,入汇口水体富营养化程度显著下降,中央库区灌溉取水口水体富营养化指数提高了5.61~16.00。

关键词:渔光互补工程;富营养化;水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型;柳堰集水库

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)05-0001-08

Study on numerical simulation of impact of fishery-light complementary project on water environment in Liuyanji Reservoir //ZHANG Wanshun^{1,2,3}, DENG Langlang¹, PENG Hong⁴, LIU Xin¹, JIANG Anna¹, ZHOU Feng¹ (1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In response to the lack of precise quantitative research on the impact of fishery-light complementary projects on the water environment, a hydrodynamic-water quality-water ecology-engineering coupling numerical model was constructed in Liuyanji Reservoir. The spatiotemporal distribution of mass concentration of water temperature (T), chemical oxygen demand (COD), dissolved oxygen (DO), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and chlorophyll-a (Chl-a) in the reservoir area was simulated after the implementation of the fishery-light complementary project in August 2020, and the eutrophication index of the water body was calculated. The results showed that after the implementation of the fishery-light complementary project, T and the mass concentrations of DO and Chl-a in Liuyanji Reservoir decreased by 0~6℃, 0~0.02 mg/L, and 0~0.0005 mg/L, respectively, while the mass concentration of COD increased by 0~10 mg/L. The mass concentrations of TP and TN varied very differently in the water area under photovoltaic panel than in the water area without panel. The mass concentration of TP in the water area under photovoltaic panel increased by 0~0.814 mg/L, while the mass concentration of TN decreased by 0~0.125 mg/L. The differences in water quality indicators before and after the implementation of the fishery-light complementary project gradually decreased with time, and the eutrophication degree of the water at the inlet significantly decreased. The eutrophication index of the water at the irrigation intake in the central reservoir area had increased by 5.61~16.00.

Key words: fishery-light complementary project; eutrophication; hydrodynamic-water quality-water ecology-engineering coupling numerical model; Liuyanji Reservoir

在能源短缺和传统化石能源消耗造成生态环境严重破坏的大背景下,渔光互补作为一种新型“光伏+”产业模式,将太阳能光伏发电与传统渔业结合,助力能源供应脱碳,赋能双碳目标和高质量发展,成为国家重要的能源改革途径之一^[1-2]。尽管渔光互补光伏发电产业具有诸多优点,但针对渔光互补工程对水环境的物理、化学、生物作用机制的影响研究较为匮乏,渔光互补工程对水质及水生态指标的影响效应至今仍缺乏全面、精准的量化研究,渔光互补工程的环境效应仍不明确,使政府审批工作缺乏支撑依据^[3],制约了渔光互补产业的推广应用。研究渔光互补工程对水环境的影响效应和影响程度,对指导水上光伏工程的建设,促进光伏发电工程与社会、环境协调发展,助力碳达峰碳中和战略的实现具有重要的意义^[4]。

建立基于机理驱动的流域水环境数值模型实现对研究区域水环境时空演变规律的模拟,是研究渔光互补工程对水环境的影响的重要方法,已有学者通过构建 MyLake 模型^[5]、Ce-qual-W2 模型^[6]、ELCOM-CAEDYM 模型^[7]等开展了光伏工程影响下水体水环境变化规律模拟研究。以上模型主要是通过人为改变入射太阳辐射、糙率和地形高程^[8]等输入条件,概化光伏板的遮光效应和工程本身的阻水作用,尚未从机理上实现工程模式与模型的耦合,更侧重于研究光伏工程对能量、水质、水文过程、生态要素^[9]等单一过程或要素的影响,存在模拟指标体系不完善、评价结果准确性较差、要素过程单一等问题。例如:Yang 等^[10]构建了动态预报温度和热通量的模型,在与水体水动力、生态环境模型耦合方面还需进一步完善;张万顺等^[11-13]构建的“空-地-水”一体化模型耦合了流域陆地源模型、水动力模型、水质模型、水生态模型和工程模式,能够精细模拟工程影响下水环境时空动态变化特征,实现了水量-水质-生态-工程多要素全过程的底层耦合,但应在此基础上完善光伏工程影响模式,从而实现水陆统筹视角下光伏工程对水动力、水温、水质和生态等过程或要素影响的精准定量研究。

本文以柳堰集水库为研究区,构建水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型体系,选取水温(T)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl-a)的质量浓度进行模拟,分析自然情景和渔光互补工程实施后水库各指标的时空变化规律,揭示工程对水库生态环境的影响效应,旨在实现社会过程、自然过程和光伏工程影响的耦合,明晰渔光互补水上光伏发电工程的环境效应,为科学规划渔光互补光伏发电产业提供参考。

1 研究区概况与数据来源

柳堰集水库位于襄阳市襄州区石桥镇柳堰集村(东经 $111^{\circ}52' \sim 111^{\circ}55'$, 北纬 $32^{\circ}18' \sim 32^{\circ}22'$),地处亚热带季风气候区,光照充足、热量丰富、气候温和,夏季炎热多雨,冬季温湿偏寒,多年平均降水量为 769.9 mm,多年平均蒸发量为 1 741 mm,年平均气温 15.3°C 。该水库是一座以灌溉为主,兼有防洪、养殖等综合利用效益的中型水库,水库上游补水来自引丹干渠,库区附近以平原耕地为主。水库总库容为 1654 m^3 ,主汛期为 6—8 月,正常蓄水位为 124.0 m。水库水质类别达到地表水Ⅲ类标准,水库周边无点源排放,主要污染来源为农业面源和水产养殖,汛期降雨径流冲刷下水库污染物浓度较高^[14]。光伏板分布如图 1 所示,投影面积占水库的 17%。

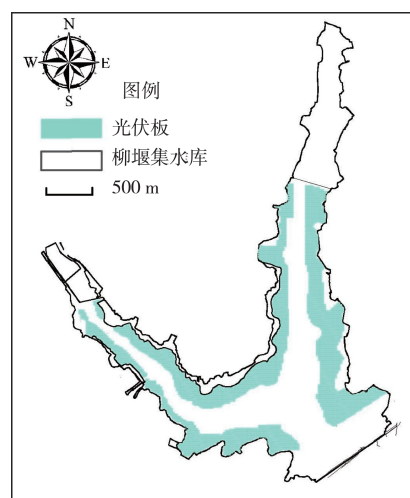


图 1 柳堰集水库光伏工程分布

Fig. 1 Distribution of water photovoltaic construction areas in Liuyanji Reservoir

基于 12.5 m 分辨率的数字高程模型,将研究区域划分为 94 个子流域单元。流域陆地源模型运行需要的数据集包括气象数据、土地利用数据、土壤数据以及污染源数据。利用 2020 年中国气象科学数据共享中心老河口气象站的相对湿度、日降水量、气温、风速数据建立气象数据库;利用中国科学院资源环境科学数据中心第 8 期 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的土地利用数据建立土地利用数据库;基于中国科学院南京土壤研究所的中国土壤数据集建立土壤数据库;基于 2021 年襄阳统计年鉴获得污染源数据。

2 研究方法

2.1 水库水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型体系

水库水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型体

系包含流域陆地源模型、水库水动力模型、水质模型、水温模型及藻类生长动力学模型。

a. 流域陆地源模型。采用 SWAT 模型作为流域面源污染模型,包含水文模块、土壤侵蚀模块、污染负荷模块,基于地表特征将流域划分为不同的子流域和水文响应单元,模拟陆面水文过程及污染物的迁移转化过程^[15]。

b. 水动力模型。水动力模型包含水流连续方程和动量方程,耦合工程结构物、光伏单元及桩柱的影响,方程为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huu) + \frac{\partial}{\partial y}(hvu) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \lambda u + F_{Du} = \\ fvh + \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h \frac{\gamma_t}{\sigma} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[h \frac{\gamma_t}{\sigma} v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hvv) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \lambda v + F_{Dv} = \\ -fuh + \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left[h \frac{\gamma_t}{\sigma} v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left(h \frac{\gamma_t}{\sigma} \frac{\partial v}{\partial y}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\lambda = \frac{gn^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$

$$F_D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A + \lambda \frac{gn' \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向的垂向平均速度; z 为水面高程; h 为水深; γ_t 为紊动黏性系数; n 为糙率; f 为柯氏力常数, $f = 2\Omega \sin \varphi$, φ 为纬度, Ω 为地转角速度; g 为重力加速度; ρ 为水体密度; τ_x 、 τ_y 为分别为 x 、 y 方向上的风切应力; F_{Du} 、 F_{Dv} 为水体中桩桩等阻水物体产生的附加阻力; n 为桩柱总数; C_D 为扰流阻力系数; A 为桩柱在垂直于流体运动方向上的投影面积; λ 为阻力系数; n' 为糙率。

c. 水质模型。基于质量守恒定律,建立污染物对流扩散迁移转化方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\rho_i}{\partial t} + \frac{\partial hu\rho_i}{\partial x} + \frac{\partial hv\rho_i}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(h \frac{\gamma_t}{\sigma_{\rho_i}} \frac{\partial \rho_i}{\partial x}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(h \frac{\gamma_t}{\sigma_{\rho_i}} \frac{\partial \rho_i}{\partial y}\right) &- hk_p \rho_i + hS_i + S_m \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为水体物质质量浓度; k_p 为水体物质的降解系数; S_i 为水体物质的转化项; S_m 为源汇项; σ_{ρ_i} 为经验参数。

水体中的 DO 质量浓度由水体的富氧过程和耗氧过程综合决定,计算公式为

$$\rho(\text{DO}) = k_1(\rho_s - \rho) - k_2\rho(\text{BOD}) + (P_o - R_o) \quad (4)$$

式中: $\rho(\text{DO})$ 为水中溶解氧浓度; $\rho(\text{BOD})$ 为水中总生化需氧量; k_1 为复氧速率; k_2 为耗氧速率; ρ_s 为

饱和溶解氧浓度; P_o 为水生植物光合作用的产氧量; R_o 为水生植物呼吸作用的耗氧量。

d. 水温模型。模型中水温计算公式^[16-17]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} &= \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) &- \frac{S_T}{\rho c_p h} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向上的热扩散系数; c_p 为水的比热; S_T 为水汽界面辐射通量。

e. 藻类生长动力学模型。自然状态下藻类的生长率和死亡率共同决定了藻类的生物量。光照、营养盐、水动力条件、种间竞争等都会通过影响藻类的生长或者死亡过程,从而对藻类生物量造成影响。天然水体中藻类的生消往往是由多种因素共同决定的,相关研究表明藻类的生长率可以认为是多种影响因素的乘积,死亡率可以表达为多种影响因素叠加的结果^[18]。因此天然水体中藻类生长动力学过程可以表示为

$$I_C = \prod_{i=1}^{m_1} G(x_i) - \sum_{i=1}^{m_2} D(y_i) \quad (6)$$

式中: I_C 为藻类生长指数; G 为生长率函数; D 为死亡率函数; x_i 为促进藻类生长的影响因子; y_i 为造成藻类消亡的影响因子; m_1 为促进生长的影响因子个数; m_2 为造成藻类消亡的影响因子个数。

2.2 柳堰集水库模型体系设置与验证

2.2.1 模型设置

根据 SWAT 模型的输出结果,将水库附近汇水点的流量及水质浓度经过处理作为侧流入输入水库二维水动力水质模型。二维模型中,为更精准描述水库溢流过程,溢流堰处网格尺寸设置为 10 m,库区设置为 20 m,全区域共设有 9 934 个网格。选取溢流堰、灌溉取水口、水库库心、西北入汇口、东北入汇口 5 个特征点位作为模型验证点位,水库网格布设如图 2 所示。

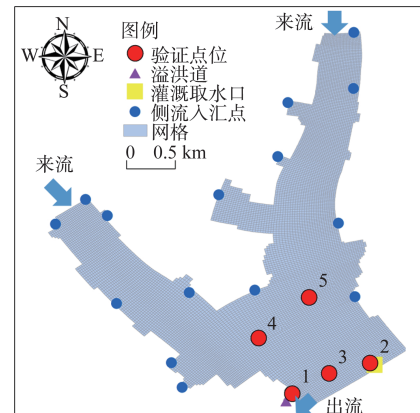


图 2 研究区入汇点位、验证点位及网格设置

Fig. 2 Entry position, verification points and grid setting in study area

2.2.2 模型验证

参考相关研究获得模型相关参数^[11-12,19],水库糙率取值为0.022~0.025,藻类生长率和死亡率分别取值为0.8 d⁻¹和0.005 d⁻¹,COD、DO、TP、TN的降解系数及底泥释放系数取值范围见表1。利用2020年8月31日柳堰集水库中心点位的监测数据对水库水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型进行验证,结果见表2,各指标相对误差均在15%以内,表明模型可以满足柳堰集水库水质模拟的要求。

表1 降解系数与释放系数取值范围

Table 1 The range of degradation coefficient and release coefficient

指标	降解系数/d ⁻¹	释放系数/d ⁻¹
COD	0.15~0.50	0.1~3.3
DO	0.055~0.165	0.5~1.0
TP	0.055~0.220	0.02~0.50
TN	0.060~0.165	0.5~1.0

表2 模型验证结果

Table 2 Model validation results

位置	相对误差/%						<i>T</i>
	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{Chl-a})$	<i>z</i>	
溢流堰	4.734	-12.250	-7.500	-11.765	-12.500	0.121	13.793
灌溉取水口	5.200	-14.748	-13.333	11.321	-6.667	-0.016	-12.121
水库库心	4.747	-4.681	4.000	5.204	-7.143	0.234	7.143
西北入汇口	-9.184	-10.526	-11.111	-11.538	-10.000	0.145	3.333
东北入汇口	-8.383	-8.989	9.375	-1.724	10.000	0.089	3.333

2.3 水体富营养化评价

水体富营养化会严重影响周边居民生活饮水、工业生产等活动,妨碍水资源可持续利用,评估渔光互补工程实施前后水体富营养程度的变化是分析工程环境影响的关键步骤。选择在我国湖库得到广泛应用的对数型幂函数普适指数公式^[20-21]对自然情景和渔光互补工程布设情景下的水库营养状态进行评价,水体富营养化指数计算公式为

$$I_E = 10.77 \sum_{j=1}^{n_1} w_j (\ln x_j)^{1.1826} \quad (7)$$

式中: I_E 为水体富营养化指数; w_j 为指标 j 的归一化权重; x_j 为指标 j 的规范值; n_1 为指标数。

选取评价指标为灌溉取水口 COD_{Mn}、DO、TP、TN、Chl-a 的质量浓度,将各指标视作等权重,标准化处理后计算 I_E 值,结合相应的分级标准(表3)^[21]判断水体富营养化等级。

表3 营养状态分级标准值

Table 3 classified standard values of nutritional status

等级	富营养化程度	I_E
1级	贫营养	≤ 20.00
2级	中营养	$> 20.00 \sim 39.42$
3级	富营养	$> 39.42 \sim 61.29$
4级	重富营养	$> 61.29 \sim 76.28$
5级	极富营养	$> 76.28 \sim 99.77$

3 结果与分析

3.1 渔光互补工程对水质的影响

柳堰集水库的污染主要来自降雨冲刷下周边非点源污染物质入汇,主汛期非点源污染影响更为显著^[14],且夏季太阳辐射较大,水体营养物质和藻类生长更加活跃^[22],因此选择2020年主汛期8月作为研究时期。基于已构建的柳堰集水库水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型体系,模拟2020年8月无渔光互补光伏发电工程的自然情景和实施了渔光互补光伏发电工程的已布设情景下 COD、DO、TP、TN、Chl-a 质量浓度及水温的时空变化过程。2020年8月水温和水质指标质量浓度的变化情况如图3所示。选取中央库区内人类取水活动频繁的灌溉取水口作为特征点,对比渔光互补工程实施前后的自然情景和已布设情景下 COD、DO、TP、TN、Chl-a 质量浓度和水温变化情况。由图3可见,随着时间的变化水温呈上升趋势,相较于自然情景,渔光互补工程实施后水温整体下降了0~3.44℃,处于20~30℃的范围内。水温变化幅度先增大后减小,局部水温呈轻微上升的趋势,可能与光伏工程对蒸散发的影响有关。在昼夜交替光照变化下,Chl-a 质量浓度随着时间呈波动上升趋势,工程实施后 Chl-a 质量浓度下降了0~0.001 mg/L,且在白天对 Chl-a 的质量浓度影响更大。DO 质量浓度随时间先下降后升高后趋于稳定,工程实施后 DO 质量浓度下降了0~0.654 mg/L,下降的幅度逐渐减小,这一改变可能受水温变化影响。COD、TN 的质量浓度在已布设情景下随时间推移最终呈现上升趋势,分别比自然情景下增加了0~2.175 mg/L 和0~0.085 mg/L,增幅随时间逐渐减小。TP 质量浓度随时间逐渐减小,工程实施前后质量浓度变化不大。从时间变化趋势来看,各指标在工程实施前后的差异呈逐渐减小的趋势。

图4和图5分别为自然情景下和已布设情景下水温及水质指标质量浓度空间分布。由图4可见,在自然情景下,库区水温整体处于28~35℃范围内,两侧入汇口水温高于库心,工程实施后库区水温整体降低了0~6℃。库区水温保持在24~35℃范

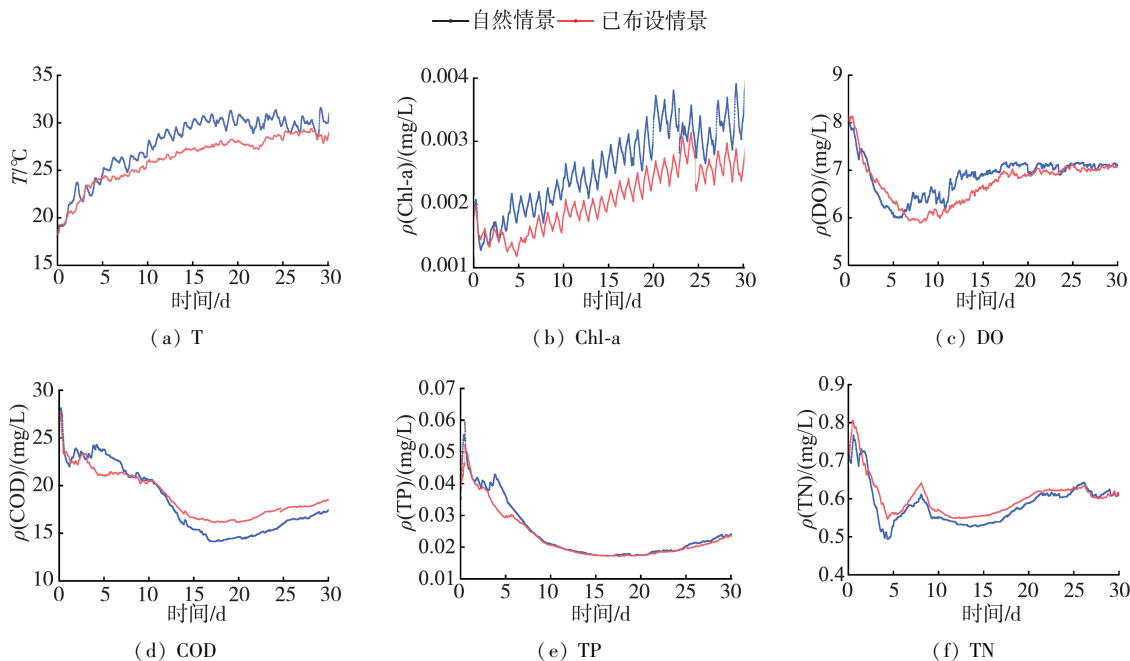


图3 2020年8月水温和水质指标质量浓度变化

Fig.3 Variation of temperature and water quality mass concentration in August 2020

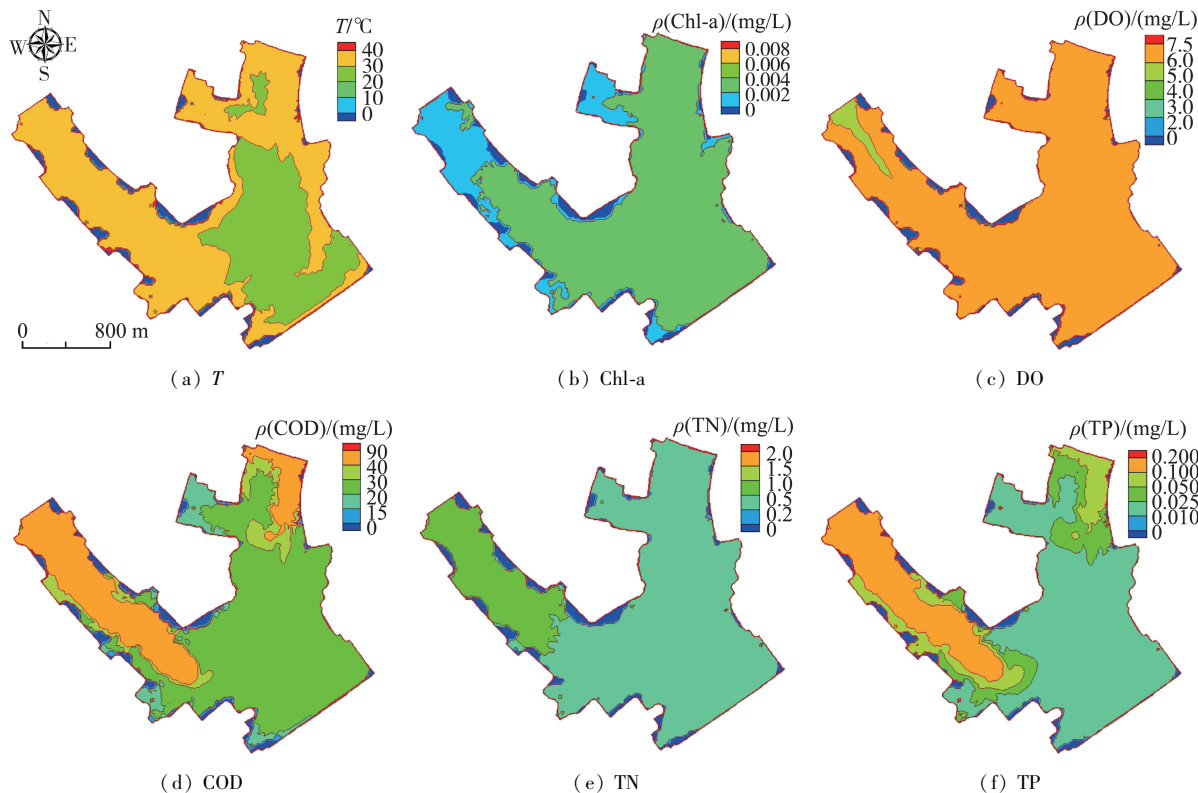


图4 自然情景下水温及水质指标质量浓度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of water temperature and mass concentration of water quality indicators under natural scenario

围内,下降程度大于两侧入汇口。水温降低对藻类及浮游植物的生长有一定的抑制作用,同时可降低内源污染物的释放^[23]。下降后的水温仍旧处于饲养鱼的适宜生长区间,对鱼类生长活动没有太大影响。自然情景下库区 Chl-a 质量浓度范围为 0 ~ 7.7 $\mu\text{g/L}$,低于世界卫生组织规定的安全水环境阈值(10 $\mu\text{g/L}$),水环境状况较好。已布设情景下库区

Chl-a 质量浓度下降了 0 ~ 0.5 $\mu\text{g/L}$,最大降低幅度为 6.50%,下降程度呈现库区东部最大,西部次之。Chl-a 质量浓度的下降能够缓解水体富营养化问题,在保持水环境稳定方面起到积极作用^[24]。库区 DO 质量浓度处于 0 ~ 9.04 mg/L,大部分库区 DO 质量浓度高于 6 mg/L,达到地表水Ⅲ类标准,西北入汇口浓度较低。水体中 DO 质量浓度受水温和水生生

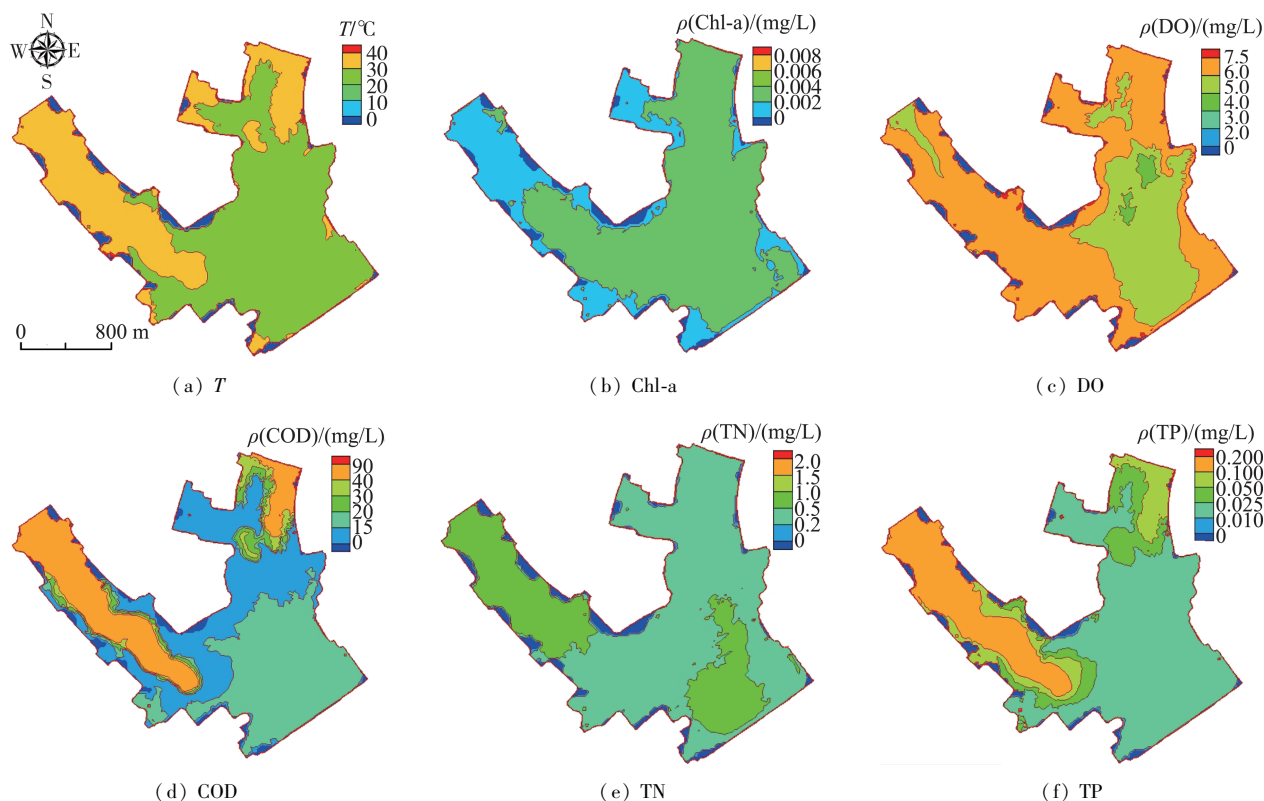


图5 已布设情景下水温及水质指标质量浓度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water temperature and mass concentration of water quality indicators under deployed scenario

物活动的共同影响,随水温的增加而降低,随浮游植物和藻类光合作用的增强而上升。光伏板抑制了水中藻类和浮游植物的光合作用,使得库区 DO 质量浓度下降了 0 ~ 0.2 mg/L,保持在 5 ~ 9 mg/L 范围内,局部光伏板下伏水域 DO 质量浓度呈上升趋势,可能是由于水温下降对 DO 的影响程度强于光合作用所致。自然情景下水库 COD、TN 和 TP 质量浓度均呈现库区西北部大于其他区域的特征。由于光伏组件的存在会改变藻类和浮游植物对营养物质的利用率^[25],渔光互补工程实施后库区 COD 质量浓度上升了 0 ~ 10 mg/L。TN 和 TP 质量浓度的变化在光伏板覆盖区域和无光伏板覆盖区域呈现差异性,光伏板下伏水域 TN 质量浓度下降了 0 ~ 0.125 mg/L、TP 质量浓度上升了 0 ~ 0.814 mg/L,无光伏板覆盖的中央库区变化趋势相反,TN 质量浓度上升了 0 ~ 0.164 mg/L、TP 质量浓度下降了 0 ~ 0.094 mg/L,库区 TN 质量浓度范围为 0.200 ~ 1.335 mg/L,TP 质量浓度范围为 0.012 ~ 0.233 mg/L。TN、TP 质量浓度呈现差异性分布的原因可能与光伏板下 DO 质量浓度和碳含量的增加对硝化反应的影响以及水温变化对底泥扰动的影响有关,综合作用下 TP、TN 质量浓度呈现不同变化趋势,工程实施后大部分库区 TN、TP 质量浓度仍处于Ⅲ类水质标准以上,TN、TP 质量浓度变化对水质等级影响较小。

3.2 渔光互补工程对水体富营养程度的影响

图6为自然情景和已布设情景下水库富营养化指数空间分布。由图6可见,在自然情景下,水体富营养化指数分布呈现西北入汇口较大,东北入汇口

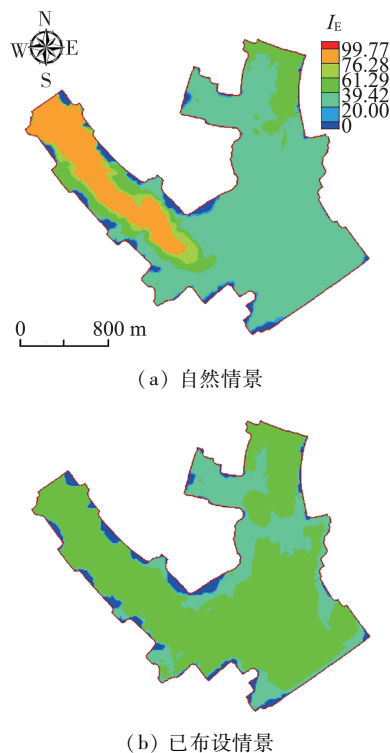


图6 自然情景和已布设情景下水库富营养化指数空间分布
Fig.6 Spatial distribution of reservoir eutrophication index under natural and deployed scenarios

次之,库心最小的特征,库区西北部富营养化状态较严重。光伏工程实施后入汇口富营养化程度显著降低,主要是 Chl-a 质量浓度下降所致,中央库区水体富营养化指数上升了 0~16,主要由 COD 和 TN 质量浓度上升所致。灌溉取水口自然情景下水体富营养化指数处于 25.70~37.63 之间,为中度营养化状态,营养程度偏低,水质较好。工程实施后水体富营养化指数上升了 5.61~16.00,营养等级上升为轻度富营养状态。水体富营养化指数的升高主要是由于 COD 和 TN 质量浓度的升高导致,但从藻类及浮游植物的生长情况来看,Chl-a 质量浓度呈下降趋势。总体来看,渔光互补工程未对库区的营养状态产生显著影响。

4 结 论

a. 通过耦合流域陆地面源模型、水库水动力模型、水质模型、水生态模型和光伏工程影响模式,建立了柳堰集水库水动力-水质-水生态-工程耦合数值模型体系,模型模拟相对误差均在 15% 以内,可以实现渔光互补工程影响下水环境时空动态变化的精细模拟。

b. 空间分析表明,渔光互补工程实施后,水温和 Chl-a、DO 质量浓度均呈现下降趋势,光伏板下伏水域 TN 质量浓度下降、TP 质量浓度升高,库心水域变化趋势则相反;时间分析表明,各指标在工程实施前后的差异呈逐渐减小的趋势。尽管渔光互补工程实施前后各指标浓度发生改变,但水库水环境等级并未发生显著变化,工程实施对水质未造成根本影响。

c. 自然情景下柳堰集水库处于中营养状态,渔光互补工程布设情景下入汇口水体富营养化程度显著下降,中央库区水体富营养化指数升高了 5.61~16.00,呈现上升趋势,水体富营养化等级略有升高,但未对库区的营养状态产生显著影响。

参考文献:

[1] ZOU Hongyang, DU Huibin, REN Jingzheng, et al. Market dynamics, innovation, and transition in China's solar photovoltaic (PV) industry: a critical review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69 (C):197-206.

[2] 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):4822-4822.

[3] 罗志雄. 河湖管理范围内渔光互补项目存在的问题与对策[J]. 江西水利科技, 2022, 48 (5):376-377. (LUO

Zhixiong. Problems and countermeasures of fishing light complementary projects within the scope of river and lake management [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2022, 48 (5):376-377. (in Chinese))

[4] 熊鸿斌,周凌燕. 基于 PSR-灰靶模型的巢湖环湖防洪治理工程生态环境影响评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (9):1977-1987. (XIONG Hongbin, ZHOU Lingyan. Using PSR-grey target model to assess ecological and environmental impact of flood regulation project at riparian zone around Lake Chaohu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27 (9):1977-1987. (in Chinese))

[5] GILES Exley, ALONA Armstrong, TREVOR Page, et al. Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification[J]. Solar Energy, 2021, 219 (3):24-33.

[6] JI Qianfeng, LI Kefeng, WANG Yuanming, et al. Effect of floating photovoltaic system on water temperature of deep reservoir and assessment of its potential benefits: a case on Xiangjiaba Reservoir with hydropower station [J]. Renewable Energy, 2022, 195 (1):946-956.

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

[8] 喻海军,马建明,田培,等. 渔光互补光伏发电项目防洪影响分析[C]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集(第一分册). 北京:中国水利学会, 2022:6.

[9] CHATEAU 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.

[10] YANG P P, CHUA L H C, IRVINE K N, et al. Radiation and energy budget dynamics associated with a floating photovoltaic system [J]. Water Research, 2021, 206 (7411):117745.

[11] 张万顺,张紫倩,彭虹,等. 粤港澳大湾区金山湖流域水质变化规律[J]. 水资源保护, 2021, 37 (5):1-8. (ZHANG Wanshun, ZHANG Ziqian, PENG Hong, et al. Water quality variations of Jinshan Lake Basin in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5):1-8. (in Chinese))

[12] 张万顺,李琳,彭虹,等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1):167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1):167-175. (in Chinese))

[13] 张万顺,王浩. 流域水环境水生态智慧化管理云平台及应用[J]. 水利学报, 2021, 52 (2):142-149. (ZHANG

- Wanshun, WANG Hao. Cloud platform and application of watershed water environment and aquatic ecology intelligent management [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 142-149. (in Chinese)
- [14] 郑晓燕, 张万顺, 徐高洪, 等. 暴雨对梁子湖水动力和水质的影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(9): 17-21. (ZHENG Xiaoyan, ZHANG Wanshun, XU Gaohong, et al. Study on impact of storm on hydrodynamic and water quality of Liangzi Lake[J]. Yangtze River, 2016, 47(9): 17-21 (in Chinese))
- [15] 张万顺, 卜思凡, 彭虹, 等. 基于 WRF 模型的澎溪河流域非点源污染预测[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 160-167. (ZHANG Wanshun, BU Sifan, PENG Hong, et al. Prediction of non-point source pollution in Pengxi River Basin based on WRF model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 160-167. (in Chinese))
- [16] 杨寅群. 流域水环境系统模型研究及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [17] 万晶. 水-底泥-植物耦合作用对水质影响机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [18] 徐艳红. 基于水体藻类累积动力学模型的水华风险评价方法研究及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [19] 王生愿, 张万顺, 吴扬, 等. 湖泊湿地生态系统水动力、水生态数学模型研究[J]. 河南科学, 2015, 33(5): 814-818. (WANG Shengyuan, ZHANG Wanshun, WU Yang, et al. The hydrodynamic and water ecological mathematical model of lake wetland ecosystem [J]. Henan Science, 2015, 33(5): 814-818. (in Chinese))
- [20] 李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. 富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 664-672. (LI Zuoyong, WANG Jiayang, GUO Chun. A universal index formula for eutrophic evaluation using a logarithmic power function [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(3): 664-672. (in Chinese))
- [21] 马迎群, 曹伟, 赵艳民, 等. 典型平原河网区水体富营养化特征、成因分析及控制对策研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 174-183. (MA Yingqun, CAO Wei, ZHAO Yanmin, et al. Eutrophication characteristics, cause analysis and control strategies in a typical plain river network region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(2): 174-183 (in Chinese))
- [22] 夏丽, 林爱文, 覃文敏, 等. 1980—2013 年湖北省地表太阳辐射时空特征及其驱动因子分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 29-33. (XIA Li, LIN Aiwen, QIN Wenmin, et al. Spatio-temporal characteristics of solar radiation and its driving factors in Hubei Province during 1980-2013 [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 29-33. (in Chinese))
- [23] 杨婧. 四平地区某水库内源磷释放通量影响因素研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2021.
- [24] 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 localecology [J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(9): 38-44. (in Chinese))
- [25] 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. The influence of floating photovoltaic power station on key indicators of water ecological environment [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 204-211. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-02-19 编辑: 王芳)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊, 针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985 年创刊, 经过 30 多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是美国《工程索引》(EI)收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊, 同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等数据库收录。

《水资源保护》一直以来都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30 元/册, 全年共计 180 元, 每逢单月 20 日出版。邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路 1 号 电话: (025) 83786642

电子邮箱: bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn