

马超, 李鑫杨. 水面光伏抑制蒸发作用对应节水量的优化配置: 以白洋淀湿地补水为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 742-750. MA C, LI X Y. Optimal allocation of water saving of evaporation suppression by floating photovoltaic: A case study of Baiyangdian Wetland[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 742-750. (in Chinese)

水面光伏抑制蒸发作用对应节水量的优化配置

——以白洋淀湿地补水为例

马超, 李鑫杨

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要:水面光伏可通过组件等的遮挡作用减少建设水域蒸发损失, 规模开发后形成显著的抑制蒸发的节水潜力, 如何再配置上述节水量以实现最佳水资源利用是亟待解决的问题。基于此, 结合湿地生态补水问题, 以湿地优势物种价值增量最大、湿地水资源保障能力增量最大和水源地用水效益损失最小为目标, 构建水面光伏抑制蒸发作用对应节水量的优化配置模型, 并以典型湿地——白洋淀进行案例分析。结果表明: 水面光伏抑制蒸发的节水可在改善湿地生态补水工作中发挥关键作用。白洋淀低、中和高补水需求下, 芦苇经济价值最大增加 0.5 亿、2.6 亿和 5.5 亿元, 水资源保障能力提高 61%、42% 和 28%, 丹江口水库在丰水年、平水年和枯水年的平均最小发电损失为 0.25 亿、0.38 亿和 0.43 亿 kW·h。白洋淀补水需求和丹江口水库来水的不同遭遇情景的配置方案表明: 白洋淀在低补水需求时, 建议高流量补水时段为 3—6 月和 9 月; 在白洋淀中、高补水需求时, 建议高流量补水时段为 10 月—次年 2 月或 3—6 月。

关键词:水面光伏系统; 抑制蒸发; 节水; 多目标优化; 南水北调中线工程; 白洋淀湿地

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0072

水面光伏是太阳能开发利用的重要方式之一。相比陆上光伏, 水面光伏具有减少土地利用、基于水冷作用的更高发电效率、通过遮挡和降低水面风速抑制蒸发的节水等优势^[1-3]。水面光伏已在蓄水池、采煤塌陷区以及湖泊等多类型水域成功应用^[4-9], 业界和学者也在探究将其应用于输水渠道的可行性。目前印度已在 6.16 km 的输水渠道上建成了 3 MW 的水面光伏。国内外多位学者^[10-13]评估了运河和长距离输水工程开发水面光伏的经济和技术可行性, 也均讨论了水面光伏建成后遮挡抑制蒸发的节水效应。输水工程是均衡区域水资源分布格局和缓解区域水资源压力的有效手段, 从更好发挥工程作用出发, 应提出输水工程建设水面光伏后形成的节水及其高效配置方式, 抑制蒸发作用对应的节水量化方法和节水多目标配置模型将是重点关注内容。

在水面光伏抑制蒸发节水量化方面, 国内外学

者重点开展了水面光伏建设水域的水面蒸发理论计算模型研究。Bontempo 等^[14]回顾了常用的 6 种无覆盖水面蒸发计算数学模型, 并采用实验设计法和线性回归法建立了计算日蒸发速率的有覆盖修正模型。叶天歌等^[15]基于湖泊水面光伏电站的实测数据建立了逐小时的蒸发量线性回归计算模型。Ma 等^[16]基于 Penman-Monteith 公式, 结合太阳辐照和风速修正公式, 提出了减少蒸发节水计算模型, 并评估了我国 8 个典型的长距离输水渠道建设水面光伏的潜力, 计算表明年抑制蒸发的节水量约为 3.19 亿 m³。总结目前研究, 水面光伏抑制蒸发效率从 25% 到 90% 不等^[17-19]。但关于节水后续配置和利用研究很少, 仅有少数学者将水面光伏抑制蒸发的节水反馈于其他部门用水。Prinsloo 等^[20]研究表明, 将 72 kW 水面光伏抑制蒸发的节水量用于农业种植葡萄, 每年葡萄产量增加 1.98 t。Farfan 等^[21]

收稿日期: 2023-04-09 修回日期: 2023-07-04 网络出版时间: 2023-08-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230810.1523.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079087; 51722906)

作者简介: 马超(1981—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士, 主要从事清洁能源协同开发与高效利用、水面光伏实证及能-水系统管理研究。E-mail: mac_tju@tju.edu.cn

和 Ravichandran 等^[22] 则计算了将水面光伏系统每天抑制蒸发的节水量用于水力发电的额外电能产出。

输水工程有特定的供水对象,包括城市和湖泊湿地等。水面光伏抑制蒸发的节水量配置面向不同对象将产生不同的效益。以南水北调中线工程为例,其向白洋淀实施生态补水极大缓解了白洋淀干淀现象,淀内植被生物量明显增加,水环境得到明显改善^[23]。在配置方法和模型方面:彭安帮等^[24] 提出利用丹江口水库弃水向南水北调中线受水区进行生态补水,以生态补水量最大、水库总弃水量最小和三方供水缺水率最小为目标建立了水库多目标调度模型,得出了调度方案集和最优生态补水调度线。李欣怡^[25] 建立了白洋淀上游水库群联合调度模型,得到以农业供水、白洋淀生态补水和综合供水保证率最大为多目标的水库优化调度方案;高佳鸣^[26] 以引黄入冀补淀工程为研究对象,制定了针对白洋淀生态补水和引黄灌区农业用水需求的

水资源调度方案。目前关于水面光伏抑制蒸发的节水量用于生态补水的研究较少。Ma 等^[16] 提出将南水北调中线干渠布置水面光伏后抑制蒸发的节水量作为生态补水逐月补给到白洋淀,并测算了效益增量。但在水面光伏开发方面,忽略了配套的调蓄水库,而在生态补水方面仅计算了淀区月水位的增长变化,并未考虑输水渠道源头水库的运行规则和节水的优化配置。

基于此,以南水北调中线干渠及其沿线调蓄水库(简称中线工程)和白洋淀为研究对象,开展面向湿地生态补水需求的水面光伏抑制蒸发的节水量优化配置研究,技术路线见图 1。构建优势物种生长价值增量最大、水资源保障能力增量最大和水源地用水效益损失最小的多目标优化配置模型,基于情景模拟结果揭示多目标间的竞争关系并提出面向湿地生态补水的水资源配置建议,从而为未来可能的工程实践提供决策参考。

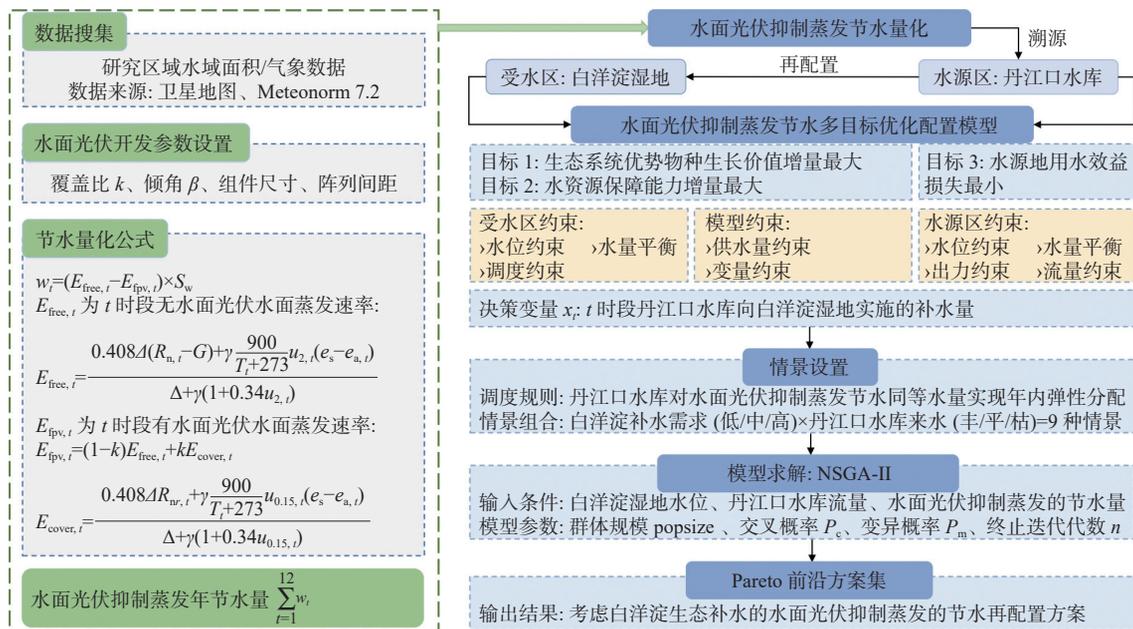


图 1 研究技术路线

Fig. 1 Research technology route

1 水面光伏抑制蒸发的节水量多目标优化配置模型

水面光伏抑制蒸发的节水量多目标优化配置模型同时考虑了受水区的用水需求和水源区的水资源管理。对于受水区—白洋淀湿地,以生态系统优势物种价值增量最大(目标 1)和水资源保障能力增量最大(目标 2)为目标;对于水源区—丹江口水库,以用水效益损失最小为目标(目标 3)。

1.1 决策变量

$x = (x_1, \dots, x_b, \dots, x_{12})$, x_t 为 t 时段丹江口水库向白洋淀湿地实施的补水量, 亿 m^3 , $t = 1, 2, \dots, 12$ 。

1.2 目标函数

目标 1: 生态系统优势物种生长价值增量最大。采取指示物种法^[27] 确定白洋淀湿地优势物种为芦苇,考虑直接经济价值、固碳价值、释氧价值和净化水质价值,构建芦苇价值增量最大的目标函数,表达式为

$$\max I_{RV} = q(b_1 + b_2 C_C + b_3 C_O + b_4 C_{N,P})(S_x - S_o) \quad (1)$$

式中: I_{RV} 为芦苇价值增量, 元; q 为单位面积的芦苇量, 取 $7\ 880\ t/km^{2[28]}$; b_1 为单位质量芦苇的直接经济价值, 取 $4\ 490\ 元/t^{[29]}$; b_2 为单位质量芦苇的固碳价值, 取造林成本, 为 $1\ 320\ 元/t$ (按 C 计) $^{[30]}$; b_3 为单位质量芦苇的释氧价值, 取工业制氧成本, 为 $400\ 元/t^{[30]}$; b_4 为单位质量芦苇的净化水质价值, 取氮和磷的处理成本, 分别为 $2.5\ 元/kg$ 和 $1.5\ 元/kg^{[31]}$; C_c 和 C_o 分别为芦苇吸收 CO_2 系数和释放 O_2 系数, 根据植物每合成 $1\ kg$ 干物质可以吸收 $CO_2\ 1.63\ kg$, 释放 $O_2\ 1.2\ kg$ 计算; $C_{N,P}$ 为芦苇净化水质的能力, 芦苇对氮元素和磷元素的吸收能力分别取 $2.61\ kg/t$ 和 $0.16\ kg/t^{[32-33]}$; S_x 和 S_o 为有和无丹江口水库补水时白洋淀湿地芦苇面积, km^2 。白洋淀湿地芦苇面积(S)~年均水位(\bar{l})的关系 $^{[34]}$ 为 $S = -15.73\bar{l}^2 + 215.9\bar{l} - 579.89$, $\bar{l} = \frac{\sum_{t=1}^{12} l_t}{12}$, l_t 为 t 时段白洋淀水位, 通过水位~水量关系 $^{[35]}$ $l = \frac{2.95 + \sqrt{2.95^2 - 4 \times 0.36 \times (5.98 - V)}}{0.72}$ 计算, V 为白洋淀湿地蓄水量, 亿 m^3 。

目标 2: 水资源保障能力增量最大。水资源保障能力是指湿地在考虑降水、蒸发和渗漏等外部因素和周围用水需求下仍能保障自身需水的能力。认为白洋淀湿地水资源保障能力与水位直接相关, 在白洋淀运行水位区间内, 水位越高, 水资源保障能力越强。在此引用文献 $^{[36]}$ 中的生态水位隶属度函数构建水资源保障能力函数, 水资源保障能力增量最大的表达式为

$$\max I_{WC} = r_x - r_o \quad (2)$$

式中: I_{WC} 为水资源保障能力增量; r_x 和 r_o 为有和无丹江口水库补水时白洋淀湿地水资源保障能力, 计算式 $^{[36]}$ 为 $r = \exp 1.53 \times (\bar{l} + 1.21) - 13$ 。

目标 3: 水源地用水效益损失最小。根据丹江口水库综合运行要求, 构建丹江口水库发电损失最小的目标函数, 表达式为

$$\min R_{OL} = \sum_{t=1}^{12} (P_{o,t} - P_{x,t}) \Delta t \quad (3)$$

$$P_{o,t} = A Q_{t,out} (Z_{o,t,up} - Z_{o,t,down}) \quad (4)$$

$$P_{x,t} = A \left(Q_{t,out} - \frac{x_t \times 10^8}{\Delta t \times 3\ 600} \right) (Z_{x,t,up} - Z_{x,t,down}) \quad (5)$$

式中: R_{OL} 为丹江口水库发电损失, $kW \cdot h$; $P_{o,t}$ 为补水前 t 时段丹江口水库的出力, kW ; A 为综合出力系数; $Q_{t,out}$ 为补水前 t 时段丹江口水库的下泄流量, m^3/s ; $Z_{o,t,up}$ 为补水前 t 时段丹江口上游水位, m , 由水位~库容关系得到; $Z_{o,t,down}$ 为补水前 t 时段丹江口水库尾水位, m , 由尾水位~下泄流量关系得到;

$P_{x,t}$ 为补水后 t 时段丹江口水电站的出力, kW ; $Z_{x,t,up}$ 和 $Z_{x,t,down}$ 为补水后 t 时段丹江口水电站的上游水位和尾水位, m ; Δt 为调度时段时长, h 。

1.3 目标约束

供水量约束。供水量约束公式为

$$0 \leq x_t \leq \sum_{t=1}^{12} w_t \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{12} x_t = \sum_{t=1}^{12} w_t \quad (7)$$

$$w_t = (E_{free,t} - E_{fpv,t}) \times S_w \times 10^{-5} \quad (8)$$

式中: w_t 为 t 时段水面光伏抑制蒸发节水量, 亿 m^3 ; $E_{free,t}$ 和 $E_{fpv,t}$ 分别为 t 时段无水面光伏和有水面光伏的水面蒸发速率, $mm/月$, 蒸发计算采用 Penman-Monteith 修正公式, 具体表达式详见文献 $^{[16]}$; S_w 为中线工程水面面积, km^2 。

湿地水位约束。根据《河北雄安新区 2021 年白洋淀生态补水工作方案》, 白洋淀各月水位不应超过 $7.3\ m$; 考虑芦苇的水质净化效率, 芦苇生长关键期(3—6 月)的月间水位波动应控制在 $0.3\ m$ 以内 $^{[37]}$ 。相应约束公式为

$$l_t \leq l_{max} \quad (9)$$

$$|l_{t+1} - l_t| \leq 0.3t = 6, 7, 8 \quad (10)$$

式中: l_{max} 为白洋淀的上限水位, m 。

湿地水量平衡约束。湿地水量平衡约束公式为

$$V_{t+1,BYD} = V_{t,BYD} + x_t - V_{E,t} - V_{L,t} \quad (11)$$

$$V_{E,t} = E_{BYD,t} (S_{sx,t} - S_{so,t}) \times 10^{-5} \quad (12)$$

$$V_{L,t} = (L_{x,t} - L_{o,t}) \times d_t \times 10^{-4} \quad (13)$$

式中: $V_{t,BYD}$ 和 $V_{t+1,BYD}$ 为 t 时段初和时段末白洋淀湿地的蓄水量, 亿 m^3 ; $V_{E,t}$ 为补水后 t 时段白洋淀增加的蒸发损失, 亿 m^3 ; $E_{BYD,t}$ 为 t 时段白洋淀湿地的蒸发速率, $mm/月$; $S_{sx,t}$ 和 $S_{so,t}$ 为有和无丹江口水库补水 t 时段白洋淀湿地面积, km^2 ; 计算公式 $^{[35]}$ 为 $S_{s,t} = 8.97l_t^2 - 22.34l_t - 63.7$; $V_{L,t}$ 为补水后 t 时段白洋淀增加的渗漏损失, 亿 m^3 ; $L_{x,t}$ 和 $L_{o,t}$ 为有和无丹江口水库补水 t 时段白洋淀湿地单日渗漏损失量, 万 m^3/d , 基于文献 $^{[35]}$ 的水位~单日渗漏损失数据线性插值计算; d_t 为 t 时段的天数, d 。

水源地用水约束。根据丹江口水库运行要求, 考虑水库水量平衡、特征水位、电站出力和下泄流量约束, 其公式为

$$V_{t+1,DJK} = V_{t,DJK} + 3\ 600 \times \Delta t (Q_{t,in} - Q_{t,out}) \times 10^{-8} - x_t \quad (14)$$

$$\begin{cases} Z_{t,min} \leq Z_{o,t,up} \leq Z_{t,max} \\ Z_{t,min} \leq Z_{x,t,up} \leq Z_{t,max} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{o,t} \leq P_{max} \\ P_{x,t} \leq P_{max} \end{cases} \quad (16)$$

$$Q_{t,\min} \leq Q_{t,\text{out}} - \frac{x_t \times 10^8}{\Delta t \times 3600} \leq Q_{t,\max} \quad (17)$$

式中: $V_{t,\text{DJK}}$ 、 $V_{t+1,\text{DJK}}$ 为 t 时段初和时段末的丹江口水库蓄水量, 亿 m^3 ; $Q_{t,\text{in}}$ 和 $Q_{t,\text{out}}$ 为 t 时段丹江口水库的入库和出库流量, m^3/s ; $Z_{t,\min}$ 和 $Z_{t,\max}$ 为 t 时段丹江口水库的下限和上限水位, m ; P_{\max} 为丹江口水电站出力上限, kW ; $Q_{t,\min}$ 和 $Q_{t,\max}$ 为 t 时段丹江口水库的最小和最大下泄流量, m^3/s 。

其他约束。考虑白洋淀汛期防洪要求, 主汛期(7—8月)不进行补水, 公式为

$$x_{10} = x_{11} = 0 \quad (18)$$

表1 南水北调中线工程水面光伏开发方式下抑制蒸发的节水量

Tab. 1 Results of water-saving by floating photovoltaic development in the middle route of South-to-North Water Transfer Project

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计/平均
抑制蒸发的节水量/亿 m^3	0.064	0.092	0.152	0.226	0.284	0.326	0.322	0.291	0.225	0.164	0.095	0.065	2.304
抑制蒸发效率/%	40.2	40.1	40.4	40.2	40.8	41.2	41.1	41.1	40.9	41.1	40.6	40.3	40.7

作为水源水库, 丹江口水库可对水面光伏抑制蒸发节水同等水量实现年内弹性分配, 以水文年(每年10月至次年9月)为计算周期, 以月为计算时段。考虑丹江口水库来水与白洋淀补水需求之间的丰枯遭遇, 设置白洋淀不同补水需求(低、中、高)和丹江口水库不同来水(丰、平、枯)组合的9种情景。

2.2 数据来源

白洋淀湿地不同补水需求下的逐月水位数据来源于文献[39], 渗漏损失数据来源于文献[35]。丹江口水库1978—2009年历史长系列来水资料来自于湖北省水利厅, 根据年径流量系列的排频结果, 选取1982年、2007年和1991年作为水库丰水年、平水年和枯水年的典型情景。蒸发计算所需的气象数据来源于Pvsyst软件气象数据库Meteonorm 7.2。

2.3 求解算法

本研究模型属于低维多目标优化调度问题, 因而采用NSGA-II遗传算法进行求解, 并确定了相应的Pareto解集。经过运行试验并参考收敛结果, NSGA-II算法重要参数设置如下: 群体规模Popsiz=500、交叉概率 $P_c=0.8$ 、变异概率 $P_m=0.2$ 、终止迭代代数 $n=500$ 。

3 结果分析

3.1 水面光伏抑制蒸发的节水量多目标优化配置模型结果

9种情景的水面光伏抑制蒸发节水多目标优化

2 情景设置

2.1 情景参数

水面光伏开发区域为南水北调中线干渠及调蓄水库, 基于文献资料和卫星地图, 干渠包括河南省内的明渠段共1106 km, 干渠水体表面宽度为21~73 m, 可利用调蓄水库共16座[38], 以上水域总面积约488 km^2 。基于水面光伏抑制蒸发的节水效益研究结果[16], 明渠采用架空式水面光伏, 水库采用漂浮式水面光伏, 水面覆盖比设置为50%, 组件为固定倾角(12°)布置。上述水面光伏开发方式下抑制蒸发的节水量计算结果见表1。

配置Pareto前沿见图2。对于白洋淀效益目标, 低、中和高3种补水需求情景下的 I_{RV} 最大为0.5亿、2.6亿和5.5亿元, I_{WC} 可达61%、42%和28%; 对于丹江口水库效益目标, 白洋淀3种补水需求下, 丰、平、枯3种来水条件的 R_{OL} 最小为[0.25、0.38、0.44]亿、[0.21、0.38、0.40]亿和[0.29、0.38、0.44]亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。与将水面光伏抑制蒸发的月节水量当月输送至白洋淀的方案相比, 优化配置方案明显提高了芦苇的经济价值和淀区水资源保障能力, 但也增加了对丹江口发电效益的不利影响。白洋淀低、中和高3种补水需求下的 I_{RV} 增幅为0.03亿、0.58亿和1.87亿元, I_{WC} 增幅则为49%、60%和63%; 而丹江口水库发电损失平均增加0.01亿、0.13亿和0.11亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。白洋淀效益目标(I_{RV} 和 I_{WC})和丹江口效益目标(R_{OL})存在明显的制约关系, 体现了受水区和水源区之间的水资源竞争。随着白洋淀补水需求提高和丹江口来水条件变差, 两地水资源竞争关系增加。但由于 I_{RV} 受白洋淀补水需求影响较大, 不同情景下, I_{RV} 与其他两个目标之间的关系不同。

图2为Pareto的不同方向投影, 反映了不同目标两两之间的竞争协同关系。其中, XY投影反映了白洋淀效益目标 I_{WC} 与丹江口效益目标 R_{OL} 的关系, 在不同情景下, R_{OL} 随着 I_{WC} 的增大也增大, 即发电效益随着水资源保障效益的增加而减小。由于 I_{WC} 始终随着白洋淀年均水位的增加而提高, 在 I_{WC} 目标驱动下, 10月至次年2月应采取高流量补水以提

高淀区水位,但该调度方式会对丹江口水电站的发电流量和发电水头产生不利影响,从而导致 R_{OL} 较大。从 YZ 投影可以看出,随着白洋淀补水需求提高, I_{RV} 和 R_{OL} 的关系由相互协同转为相互制约。这是因为当白洋淀的补水需求较低时,年均水位与芦苇适宜生长水位的差值较小,利用水库弃水进行补水调度即可保障芦苇用水要求,但随着白洋淀补水需求提高,为满足芦苇生长要求,10 月至次年 2 月的补水流量需求均较高,导致芦苇生长与发电之间的用水矛盾加剧。从 XZ 投影可以看出,随着白洋淀补水需求提高, I_{WC} 和 I_{RV} 之间的关系由制约转为协同,尽管 I_{WC} 和 I_{RV} 均用于表征白洋淀的补水效益,但由于目标对象不同,在不同情景下二者也将存在用水冲突,如白洋淀年均水位低于芦苇生长最适宜

水位, I_{RV} 随年均水位提高而增加,此时 I_{RV} 与 I_{WC} 与年均水位关系一致;如超过芦苇生长最适宜水位, I_{RV} 则减小,此时 I_{RV} 与 I_{WC} 与年均水位关系相反。白洋淀低补水需求的年均水位已经达到 6.6 m,该情景下继续实施生态补水,年均水位易超过芦苇生长最适宜水位(6.8~6.9 m), I_{RV} 和 I_{WC} 之间的关系转为相互制约。白洋淀中、高补水需求的年均水位分别为 6.26 m、5.95 m,与芦苇生长最适宜水位差距较大,该情景下提高年均水位对 I_{RV} 和 I_{WC} 均会产生积极影响,此时两者是协同的。因此,决策者进行水面光伏抑制蒸发节水再配置时,应结合具体情景下的不同目标之间的关系,合理选取补水时段以兼顾白洋淀湿地和丹江口水库双方的综合效益。

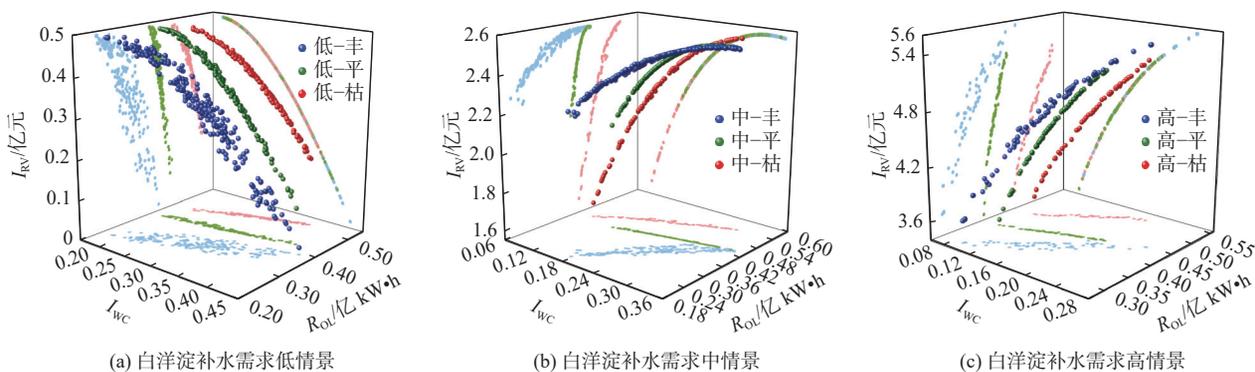


图 2 9 种情景 Pareto 前沿散点分布
Fig. 2 Pareto frontier scatter map of 9 scenarios

图 2 同时反映了各目标效益的变化范围。白洋淀补水效益一定时,丹江口水库来水越大,汛期产生弃水的概率越高,潜在弃水量越多,利用弃水为白洋淀湿地提供生态补水,可以最大程度降低对水电站出力的不利影响。因此,丹江口发电损失在丰水年最小,在枯水年最大。 I_{RV} 接近最优时, I_{WC} 或 R_{OL} 继续变化对 I_{RV} 的影响较小。以白洋淀低补水需求—丹江口丰水年情景为例,当芦苇经济价值达到 2.4 亿元时, I_{WC} 从 0.2 提高至 0.35(变幅 43%), R_{OL} 增加 0.16 亿 $kW \cdot h$ (变幅 38%),但 I_{RV} 仅增长 0.1 亿元(变幅 4%)。可见,相较于 I_{RV} , I_{WC} 和 R_{OL} 对水资源配置变化更为敏感,这说明 I_{RV} 目标最优对应的水量分配更具灵活性。白洋淀补水需求提高时,各目标效益也表现出相同的规律性。综上所述,在丹江口丰、平水年可优先保障白洋淀湿地生态补水效益目标,低补水需求的目标优先级为 $I_{RV} > I_{WC} > R_{OL}$,中、高补水需求的目标优先级为 $I_{WC} > I_{RV} > R_{OL}$;

在枯水年,兼顾水库发电效益目标,低补水需求的目标优先级为 $R_{OL} > I_{RV} > I_{WC}$,中、高补水需求的 3 个目标同等重要。

3.2 考虑白洋淀生态补水的水面光伏抑制蒸发的节水量再配置方案

为总结水面光伏抑制蒸发的节水量配置策略,根据白洋淀湿地生态补水过程,将全年分为 3 个时段,分别为白洋淀湿地常态补水时段(10 月—次年 2 月,简称 TP1)、优势物种芦苇的生长关键期(3—6 月,简称 TP2)和白洋淀湿地和丹江口水库汛期(7—9 月,简称 TP3)。

结合多目标之间的关系和不同情景下单目标占优的水量分配结果(图 3),提出考虑白洋淀生态补水的水面光伏抑制蒸发节水再配置方案如下:

(1)白洋淀低补水需求时,建议高流量补水时段为 TP2 和 TP3。如图 4 所示,该配置方案下,白洋淀年内水位变化呈波动式提高,在 9 月末达到峰值,年

均水位既满足芦苇适宜生长要求,也可使淀区保持相对较高的水资源保障能力,同时丹江口水库在该

时段进行生态补水调度有利于减小汛前水库库容,充分发挥汛期来水的发电效益。

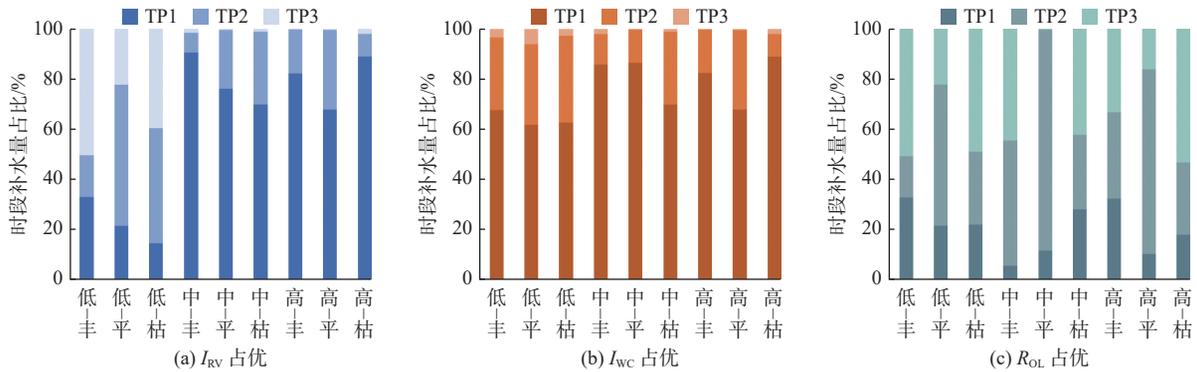


图3 不同情景下各时段补水占比结果

Fig. 3 Results of water allocation in different periods under different scenarios

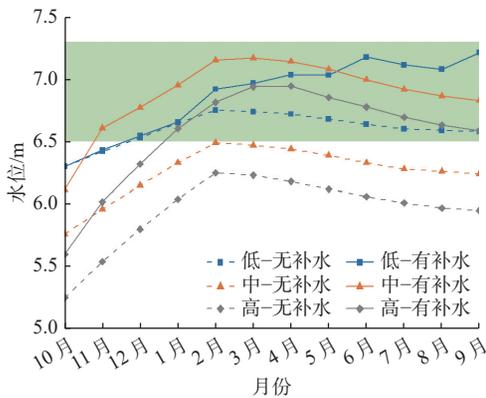


图4 白洋淀不同补水需求补水前后的年内水位过程

Fig. 4 Annual water level process of Baiyangdian under different demand scenarios before and after water replenishment

(2)白洋淀中、高补水需求时,建议高流量补水时段为 TP1 或 TP2。该配置方案下白洋淀补水前后的水位变化见图 4,白洋淀在 TP1 和 TP2 时段接收大量补水,各月水位明显提高,高运行水位(图 4 绿色区域)满足率达到 75% 以上,有效缓解了淀内缺水现象。补水前后白洋淀年内水位变化均保持先上升后下降趋势,但水位由 2 月延后至 3—4 月达到峰值,为芦苇生长关键期(3—6 月)用水提供保障,淀内芦苇经济价值和水资源保障能力同步趋向最优,同时为兼顾丹江口发电效益,补水调度方式需要结合丹江口来水条件作出适当调整。当丹江口水库来水较大时,高流量补水时段倾向 TP1,以利用水库在 10 月产生的弃水;当丹江口水库来水较少时,高流量补水时段则倾向 TP2,以降低补水调度对发电产生的不利影响。

4 结论

结合湿地缺水现象开展水面光伏抑制蒸发的节

水量优化配置研究,构建兼顾湿地和水源地双方效益的多目标优化调度模型,以优势物种价值增量最大、水资源保障能力增量最大和水源地用水效益损失最小为多目标,并以白洋淀为研究区域。主要结论如下:水面光伏抑制蒸发节水为白洋淀提供生态补水后,湿地优势物种芦苇价值增加,水资源保障能力增强,但对丹江口水库发电会造成不利影响。白洋淀低、中和高补水需求下,芦苇经济价值分别增加 0.5 亿、2.6 亿和 5.5 亿元,水资源保障能力分别提高 61%、42% 和 28%,丹江口水库丰、平和枯来水年的平均最小发电损失为 0.25 亿、0.38 亿和 0.43 亿 kW·h。丹江口水库在丰水年和平水年可优先保障白洋淀效益目标,在枯水年则需要考虑发电目标,以实现综合效益最优。针对白洋淀湿地和丹江口水库不同的丰枯遭遇情景分别提出了适宜的水面光伏抑制蒸发节水再配置方案。白洋淀低补水需求时,建议高流量补水时段为 3—6 月和 9 月;白洋淀中、高补水需求时,建议高流量补水时段为 10 月一次年 2 月或 3—6 月。丹江口水库具备多年调节能力,面向白洋淀湿地生态补水需求可进行长时间尺度模拟,既考虑年内来水情景组合,又考虑年际之间的丰枯互济。由于相关数据有限,本文情景设定时只考虑了白洋淀湿地和丹江口水库典型年组合,今后研究中可进一步采用优化方法进行长系列调节计算,以确定不同时间尺度下的调度方案,进一步完善调度规则。总体而言,水面光伏抑制蒸发节水可在改善湿地生态工作中发挥关键作用,有效推动湿地生态系统健康发展,降低其干涸风险。研究结果为水面光伏抑制蒸发作用对应的节水量再配置提供了新思路。

参考文献:

- [1] SAHU A, YADAV N, SUDHAKAR K. Floating photovoltaic power plant: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 815-824. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.051.
- [2] 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. DOI: 10.14257/ijseia.2014.8.1.07.
- [3] KUMAR M, NIYAZ H M, GUPTA R. Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 233: 111408. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111408.
- [4] FERRER GISBERT C, FERRÁN GOZÁLVEZ J J, REDÓN SANTAFÉ M, et al. A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs[J]. *Renewable Energy*, 2013, 60: 63-70. DOI: 10.1016/j.renene.2013.04.007.
- [5] 梁甜, 吴继亮, 糜文杰, 等. 漂浮式光伏发电系统在采煤塌陷区的应用[J]. *工程建设与设计*, 2019(21): 142-145. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.11.049.
- [6] REDÓN-SANTAFÉ M, FERRER-GISBERT P S, SÁNCHEZ-ROMERO F J, et al. Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66: 568-570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.006.
- [7] REDÓN-SANTAFÉ M, FERRER-GISBERT C M, FERRÁN-GOZÁLVEZ J, et al. Self energy production by a floating photovoltaic system covers for irrigation reservoirs[C]//Project Management and Engineering: Selected Papers from the 17th International AEIPRO Congress held in Logroño, Spain, in 2013. Springer International Publishing, 2015: 207-215. DOI: 10.1007/978-3-319-12754-5_16
- [8] HAFEEZ H, JANJUA A K, NISAR H, et al. Techno-economic perspective of a floating solar PV deployment over urban lakes: A case study of NUST Lake Islamabad[J]. *Solar Energy*, 2022, 231: 355-364. DOI: 10.1016/j.solener.2021.11.071.
- [9] AUGUSTIN D, CHACKO R, JACOB J. Canal top solar PV with reflectors[C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE, 2016: 1-5. DOI: 10.1109/PEDES.2016.7914465
- [10] KOUGIAS I, BÓDIS K, JÄGER-WALDAU A, et al. The potential of water infrastructure to accommodate solar PV systems in Mediterranean islands[J]. *Solar Energy*, 2016, 136: 174-182. DOI: 10.1016/j.solener.2016.07.003.
- [11] MCKUIN B, ZUMKEHR A, TA J, et al. Energy and water co-benefits from covering canals with solar panels[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(7): 609-617. DOI: 10.1038/s41893-021-00693-8.
- [12] YE B, JIANG J J, LIU J G. Feasibility of coupling PV system with long-distance water transfer: A case study of China's "South-to-North Water Diversion" [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105194. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105194.
- [13] 魏琦, 白保华, 何继江, 等. 能源与水利结合模式探索: 以南水北调西线光伏天河工程为例[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 16-22. DOI: 10.15961/j.jsuese.202101033.
- [14] BONTEMPO S F, TINA G M, GAGLIANO A, et al. An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(1): 167-188. DOI: 10.1002/er.5170.
- [15] 叶天歌, 高晓清. 湖泊光伏电站蒸发量变化特征及模型评估的对比研究[J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 996-1005. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00062.
- [16] MA C, LIU Z, He W. Water surface photovoltaic along long-distance water diversion projects and its co-benefits[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 129924. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129924.
- [17] KUMAR M, KUMAR A. Experimental validation of performance and degradation study of canal-top photovoltaic system[J]. *Applied Energy*, 2019, 243: 102-118. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.168.
- [18] GORJIAN S, SHARON H, EBADI H, et al. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy con-

- version systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124285.
- [19] ASSOULINE S, NARKIS K, OR D. Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7). DOI: 10.1029/2010wr009889. DOI: 10.1029/2010wr009889
- [20] PRINSLOO F C, SCHMITZ P, LOMBARD A. Sustainability assessment framework and methodology with trans-disciplinary numerical simulation model for analytical floatovoltaic energy system planning assessments[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101515. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101515.
- [21] FARFAN J, BREYER C. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: A virtual battery of great global potential[J]. *Energy Procedia*, 2018, 155: 403-411. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.038.
- [22] RAVICHANDRAN N, PANNEERSELVAM B. Floating photovoltaic system for Indian artificial reservoirs: An effective approach to reduce evaporation and carbon emission[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 19(8): 7951-7968. DOI: 10.1007/s13762-021-03686-4.
- [23] 唐彩红, 陈东明, 易雨君, 等. 生态补水对白洋淀湿地植被格局的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1197-1207. DOI: 10.18307/2022.0413.
- [24] 彭安帮, 马涛, 刘九夫, 等. 考虑生态补水目标的丹江口水库供水调度研究[J]. *水文*, 2021, 41(3): 82-87. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200067.
- [25] 李欣怡. 基于生态的白洋淀上游典型水库联合供水优化调度研究[D]. 济南: 济南大学, 2020. DOI: 10.27166/d.cnki.gsdcc.2020.000174
- [26] 高佳鸣. 引黄入冀补淀工程输配水合理调度研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020. DOI: 10.27109/d.cnki.ghbnu.2020.000157
- [27] 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. *应用生态学报*, 2002(4): 486-490. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2002.0116.
- [28] 李博, 刘存歧, 王军霞, 等. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2603-2607. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2009.12.026.
- [29] 张素珍, 李贵宝. 白洋淀湿地生态服务功能及价值估算[J]. *南水北调与水利科技*, 2005(4): 22-25. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2005.04.008.
- [30] 张赶年, 曹学章, 毛陶金. 白洋淀湿地补水的生态效益评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5): 605-611. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4831.2013.05.011.
- [31] 张修峰, 刘正文, 谢贻发, 等. 城市湖泊退化过程中水生生态系统服务功能价值演变评估: 以肇庆仙女湖为例[J]. *生态学报*, 2007(6): 2349-2354.
- [32] 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究[J]. *应用生态学报*, 1995(1): 76-80.
- [33] 门漱石, 赵芳, 崔秀丽. 白洋淀水生维管束植物综合利用和净化水质的探讨[J]. *环境科学*, 1995(S1): 32-34. DOI: 10.13227/j.hjcx.1995.s1.013.
- [34] 徐卫华, 欧阳志云, IRISVAN D, 等. 白洋淀地区近16年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. *水土保持学报*, 2005(4): 181-184,189. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2005.04.044.
- [35] 王凯霖. 雄安新区地下水资源和湿地的共同可持续研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000004
- [36] 张丽丽, 殷峻暹, 侯召成. 基于模糊隶属度的白洋淀生态干旱评价函数研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 252-257. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.00.
- [37] 王雨山, 尹德超, 王旭清, 等. 雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1368-1381. DOI: 10.12029/gc20210504.
- [38] 金海, 王建平, 李发鹏, 等. 南水北调中线调蓄水库运行管理面临的问题与对策[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2015, 13(6): 1191-1196. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.036.
- [39] 李聪. 引黄入冀补淀工程水量供需耦合分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2020. DOI: 10.27109/d.cnki.ghbnu.2020.000021

Optimal allocation of water saving of evaporation suppression by floating photovoltaic: A case study of Baiyangdian Wetland

MA Chao, LI Xinyang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Floating photovoltaic is a system where traditional photovoltaic modules are placed on free water, such as reservoirs, lakes, water transfer projects, coal mining subsidence area, etc. Through the shading effect of modules and other components, floating photovoltaic can reduce water evaporation and it has great potential to save water by suppressing evaporation after large-scale development. In recent years, a large number of studies have focused on the evaporation theoretical calculation model of water with floating photovoltaic and the quantification of water-saving benefits. However, there are few studies on the utilization of water-saving by suppressing evaporation of floating photovoltaic. How to reconfigure the above-mentioned water-saving to achieve the optimal utilization of water resources is an urgent problem to be solved. Due to climate change and increased competition for water resources, wetlands are facing serious water scarcity. The water transfer project not only is the engineering basis of wetland ecological replenishment, but also provides a broad water area for the floating photovoltaic construction. Based on this, the aim of this work is to purpose the optimal allocation of water-saving by suppressing evaporation of floating photovoltaic combined with wetland ecological water supplement.

An optimization model was constructed with multiple objectives of maximizing the incremental value of dominant species in wetlands, maximizing the incremental capacity of wetland water security and minimizing the loss of water use benefits in water sources, and the genetic algorithm was used to solve the model. Based on the results of scenario simulation, the competition relationship between multiple objectives was revealed and suggestions on water resource allocation for wetland ecological water replenishment were put forward. The main canal of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project and the reservoir along it were taken as the water area for floating photovoltaic construction. A case study was conducted with Baiyangdian, a typical wetland.

The results showed that when the floating photovoltaic covers 50% of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project, the annual evaporation inhibition water saving amount was 230 million m^3 . The economic value of reed species can be increased by 50 million yuan, 260 million yuan and 550 million yuan, and the water resource security ability can be improved by 61%, 42% and 28% under the scenario of low and medium to high water supplement demand. At the same time, the average minimum power generation loss of Danjiangkou Reservoir in wet, normal and dry years was 25 million kWh, 38 million kWh and 43 million kWh. According to the situations under different wet and dry scenarios in Baiyangdian Wetland and Danjiangkou Reservoir, the appropriate water-saving by suppressing evaporation of floating photovoltaic allocation scheme were proposed respectively. When Baiyangdian Wetland has low water replenishment demand, it was suggested to carry out ecological replenishment with high flow from March to June and September. When Baiyangdian Wetland water replenishment demand is medium or high, the recommended period of high flow replenishment was from October to February or March to June.

It is showed that water-saving by suppressing evaporation of floating photovoltaic can play a key role in improving wetland ecological water supplement work, and provided a new idea for water-saving by suppressing evaporation of floating photovoltaic redistribution.

Key words: floating photovoltaic system; evaporation suppression; water-saving; multi-objective optimization; the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; Baiyangdian Wetland