

## 物理材料覆盖对干旱区山前平原水库水环境与蒸发量影响分析

王绍磊<sup>1,2</sup>, 周雪莹<sup>1,2</sup>, 侍克斌<sup>1,2\*\*</sup>, 韩克武<sup>1,2</sup>, 雷欣<sup>1,2</sup>, 段宗乐<sup>1,2</sup>, 严新军<sup>1,2</sup>, 王金涵<sup>1,2</sup>

(1 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

(2 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 干旱区平原水库的水面无效蒸发问题严重, 构建高效、环保且经济的物理覆盖结构是抑制蒸发、实现水资源可持续利用的重要途径。本研究以新疆和田地区昆玉市为研究区, 在直径 6 m 的大型蒸发池中开展对照试验, 选取均质浮球、底部配重浮球和六棱钻石型浮体三种物理覆盖结构, 以全覆盖方式铺设, 并设置无覆盖空白对照组。通过长期连续监测, 系统评估了不同覆盖结构在复杂气象条件下的蒸发抑制效能及其对水体环境的影响。结果表明: (1) 水面蒸发呈现显著季节性波动, 覆盖层的抑蒸效果受多种气象因子共同驱动; (2) 覆盖单元的结构形态显著影响节水效率。在 86% 的覆盖率下, 底部配重浮球的蒸发抑制率 (70.2%) 高于均质浮球 (66.7%); 而六棱钻石型浮体在 83% 覆盖率下, 抑制率达 75.2%; (3) 水质监测显示, 浮球覆盖未引起水体二次污染, 各项指标符合农业灌溉标准; 六棱型浮体的长期生态效应需进一步观测; (4) 在满足抑蒸设计指标的基础上, 均质浮球覆盖方案具有更好的经济性与成本效益。不同物理覆盖结构的节水效益存在差异, 工程实践中应统筹考虑节水率、经济性和生态安全性进行多目标比选。本研究可为干旱区平原水库蒸发抑制技术的选型与水资源高效管理提供理论依据和数据支持。

**关键词:** 浮球; 六棱钻石型浮体; 蒸发抑制率; 水质; 节水效益

### Analysis on the impact of physical material coverage on the water environment and evaporation of piedmont plain reservoirs in arid areas

Wang Shaolei<sup>1,2</sup>, Zhou Xueying<sup>1,2</sup>, Shi Kebin<sup>1,2\*\*</sup>, Han Kewu<sup>1,2</sup>, Lei Xin<sup>1,2</sup>, Duna Zongle<sup>1,2</sup>, Yan Xinjun<sup>1,2</sup>, Wang Jinhan<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, P.R. China)

(2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, P.R. China)

**Abstract:** Plain reservoirs in arid regions suffer from substantial non-beneficial evaporation losses. The use of efficient, environmentally sound, and cost-effective physical covers to reduce open-water evaporation represents a critical pathway toward sustainable water resource utilization. This study was carried out in Kunyu City, Hotan Prefecture, Xinjiang, using large evaporation tanks with a diameter of 6 m. Three types of floating covers—homogeneous floating balls, bottom-weighted floating balls, and hexagonal diamond-shaped floating bodies—were deployed to achieve full surface coverage, with an uncovered tank serving as the control. Long-term continuous monitoring was conducted to systematically evaluate the evaporation suppression performance of each cover type under complex meteorological conditions and to assess their influence on the aquatic environment.

\*2025-11-30 收稿; 2025-12-26 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52469005)和新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室 2024 年研究生创新项目(ZDSYS-YJS-2024-06、ZDSYS-YJS-2024-27、ZDSYS-YJS-2024-59)联合资助。

\*\*通信作者; E-mail: xndsg@sina.com。

The results indicate that: (1) open-water evaporation showed pronounced seasonal variation, and the suppression effect of the covers was interactively influenced by multiple meteorological drivers; (2) the structural configuration of the covering units significantly affected water conservation efficiency. The hexagonal diamond-shaped floats attained an average evaporation suppression rate of 75.2% at a coverage ratio of 83%; under a coverage of 86%, the bottom-weighted floating balls achieved a suppression rate of 70.2%, outperforming the homogeneous floating balls (66.7%); (3) water quality analysis demonstrated that the floating ball covers did not induce secondary pollution, with all measured parameters complying with agricultural irrigation standards; the long-term ecological implications of the hexagonal floats warrant further investigation; (4) when meeting target evaporation suppression criteria, the homogeneous floating ball cover exhibited superior economic feasibility and cost-benefit performance. Different physical cover types vary in their water-saving effectiveness; therefore, engineering practice should involve multi-criteria trade-offs considering suppression efficiency, economic cost, and ecological safety. This study provides a theoretical foundation and empirical data to support the selection of evaporation mitigation technologies and enhanced water resources management for plain reservoirs in arid zones.

**Keywords:** Floating balls; Hexagonal diamond-shaped floating bodies; Evaporation inhibition rate; Water quality; Water-saving benefit

水资源不仅是基础性自然资源，更是维系生态系统健康与保障社会经济发展的战略性资源<sup>[1][2]</sup>。为应对日益严峻的水安全挑战，习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针<sup>[3]</sup>。我国水资源时空分布极不均衡，呈现显著的“东南多、西北少”特征，南方水资源占全国总量的 81.5%，显著高于北方的 18.5%<sup>[4]</sup>。新疆地处我国西北干旱区腹地<sup>[5]</sup>，其水资源短缺问题尤为严重。据统计，新疆大部分地区年降水量不足 200 mm，塔里木盆地和吐鲁番盆地  $\phi 20$  型蒸发皿蒸发量更是可达 2000-3000 mm 或以上，平原水库因蒸发而损失的水量约占总损失量的 77%<sup>[6][8]</sup>。随着绿洲扩张、尤其是耕地面积的增加致使南疆地区总需水量急剧增加<sup>[9]</sup>。平原水库作为农业灌溉用水的核心调蓄设施，在水资源储存与输配中作用关键，但其蒸发损失会显著削弱这一功能<sup>[10][11]</sup>。蒸发作为水文循环的重要环节<sup>[12]</sup>，科学有效地解决新疆地区水面蒸发问题，对于缓解区域水资源供需矛盾、推动当地经济发展及服务“一带一路”建设具有重要的现实意义<sup>[13]</sup>。

物理材料因其具有使用寿命长、环境友好等特性，覆盖于水面不仅能通过阻隔太阳辐射有效抑制水面蒸发，还可减少污染物进入水体，降低营养盐和盐分浓度，从而抑制水体富营养化和矿化度浓缩<sup>[14][16]</sup>，在抑制水面蒸发方面，已成为当前国内外学者研究的热点<sup>[17]</sup>。蒸发抑制过程具有高度非线性特征，受覆盖物的尺寸、形状、颜色等多重因素影响<sup>[18][19]</sup>。如 2020 年韩克武等<sup>[20]</sup>发现带配重的 PE 浮球在风浪扰动下具有更优的稳定性和节水效率；2021 年 Mady 等<sup>[21]</sup>对比试验发现，球体覆盖水面的蒸发抑制效果优于圆盘，夏季白色覆盖物的蒸发抑制率显著高于黑色，2023 年 Hao 等<sup>[22]</sup>发现漂浮物覆盖范围的变化会直接影响能量平衡各组成部分的大小、传递方向及相对比例，且蒸发抑制率小于实际覆盖率；2025 年王绍磊等<sup>[23]</sup>使用三种不同形状的发泡聚苯乙烯 (EPS) 材料的物理覆盖物进行对比，进一步量化了结构对蒸发的影响，发现蒸发抑制效果由高到低依次为球体、半球、圆盘。

综合国内外研究现状，尽管物理覆盖技术在节水效果方面已积累了丰富的研究成果<sup>[24]</sup>，但针对不同几何结构的高密度聚乙烯（以下简称：HDPE）材料在长期覆盖条件下的蒸发抑制效果、水环境影响及其经济可行性的综合对比研究仍相对匮乏。鉴于此，本文通过开展长序列监测试验，深入探究不同几何结构覆盖物对干旱区平原水库蒸发过程及水质理化指标的长期影响机制，并结合经济效益进行多维度评价。研究结果旨在为干旱区平原水库节水方案的优选及工程应用提供科学依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本研究试验场位于新疆和田地区昆玉市皮墨垦区，试验点具体布设于一期沉沙调节池东北侧及二期水库正上方位置，如图 1 所示。该区域地处塔克拉玛干沙漠南缘，属典型的暖温带极端干旱荒漠气候，风沙

活动频繁，沙尘天气多发。自然环境条件恶劣降水稀少且蒸发强烈，年蒸发量远大于降水量，水资源极度匮乏，主要靠冰川融水和少量地表水补给<sup>[25][26]</sup>，是开展干旱区平原水库防蒸发研究的典型区域。

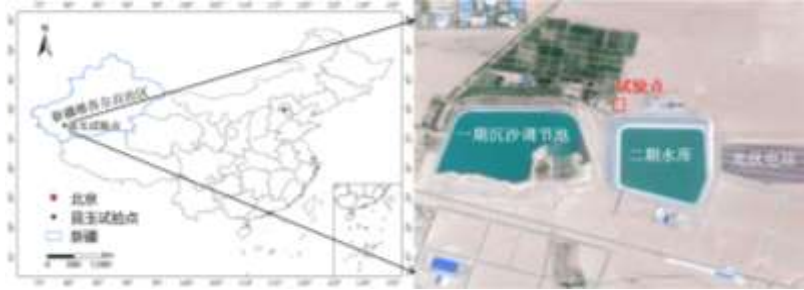


图1 试验点位置概况：左图基于中国标准地图[审图号 GS(2024) 0650]制作,底图无修改；  
右图来自四维地球 GS(2024)2646 号，影像日期 2025 年 8 月 21 日

Fig.1 Overview of the experimental site location:The left map is based on the Standard Map of China [Approval No.: GS(2024) 0650];  
the right image is sourced from Four-Dimensional Earth [GS(2024)2646], with an imaging date of August 21, 2025

## 1.2 试验方案与现场布置

试验场地的选址及蒸发池布设严格遵循《水面蒸发观测规范》(SL630-2013)<sup>[27]</sup>。依据规范要求，各蒸发池间距设定为不小于 4 m，确保单池有效水面面积不小于 1 m<sup>2</sup>。本试验所采用的蒸发池直径为 6 m，水面面积达 28.26 m<sup>2</sup>，池体总高度 2.2 m，其中埋深与出露地面高度均为 1.1 m。该装置属于大型蒸发池，其观测结果可近似反映水库等开阔水体的水面蒸发特征<sup>[28]</sup>。试验设置了三个覆盖试验组与一个空白对照组。试验组分别为两个不同厂家生产的均质浮球覆盖组(图 2 a)、底部加配重浮球覆盖组(图 2 b)以及六棱钻石型浮体覆盖组(图 2 c)。其中，球形浮体覆盖率算法是基于最大直径处垂直于水面投影面积的和与空白组水域面积之比，为 86%；六棱钻石型浮体的覆盖率算法是所有浮体正六边形面积和与空白组水域面积之比，为 83%。空白对照组不设置任何覆盖(图 2 d)。

本研究于每日北京时间 20:00 定时测定各蒸发池的水位变化，据此计算 24 小时内的水面蒸发量，蒸发损失每隔 5 天(120 小时)补充至初始水位。并通过在蒸发池旁的开阔场地上布设的紫光弘元环境观测气象站(图 2 e)进行同步、连续采集气象数据。主要监测的气象因子包括大气温度、相对湿度及风速等。这一同步观测方案旨在精确解析关键气象因子对不同覆盖条件下水面蒸发过程的影响机制。

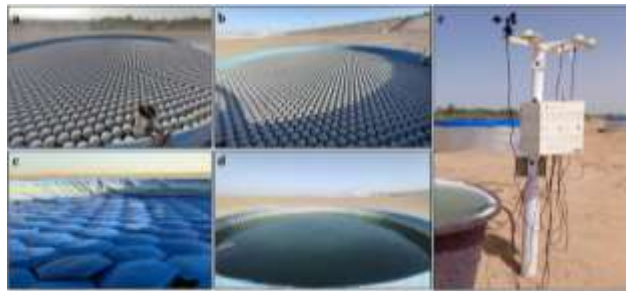


图2 试验现场布置：

a.均质浮球覆盖；b.配重浮球覆盖；c.六棱钻石型浮体覆盖；d.无任何覆盖的空白水面；e.紫光弘元环境观测气象站

Fig. 2 Layout of the test site:a. Homogeneous floating ball coverage; b. Weighted floating ball coverage; c. Hexagonal diamond-shaped floating body coverage; d. Uncovered blank water surface; e. Ziguang Hongyuan environmental observation meteorological station

浮体的材质皆为 HDPE 材料，其具体结构详见图 3。图 3 a 与图 3 b 分别展示了均质浮球与配重浮球的外观，两种球体直径均为 100 mm，平均质量都为 47 g，而均质浮球平均壁厚 1.63 mm，配重浮球平均壁厚 1.40 mm。结合图 3 c 的内部剖面可知，二者的核心差异在于内部构造：均质浮球呈中空单层壳体结构，而配重浮球在底部特定位置内嵌有质量约 6.6 g、体积约 7191.2 mm<sup>3</sup>的配重块，以调节重心。图 3 d 展示了六棱钻石型浮体的外部构造，包含概念设计图(左下)及实物拍摄图(中间)，其边长为 22.5 cm，

高 42 cm，壁厚 2 mm。

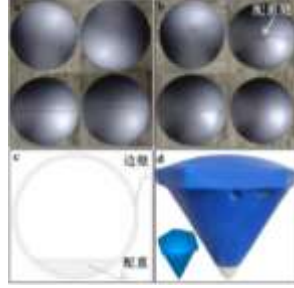


图 3 各覆盖物外观细节图：a.均质浮球；b.配重浮球；c.六棱钻石型浮体；d.浮球加配重处位置示意图

Fig. 3 Detailed appearance diagrams of various coverings: a. Homogeneous floating balls; b. Weighted floating balls; c. Hexagonal diamond-shaped floating bodies; d. Schematic diagram of the counterweight position on floating balls

### 1.3 数据收集与理论计算

本研究旨在定量评估不同物理覆盖物对蒸发抑制的效果，试验期为 2023 年 9 月至 2024 年 9 月，共 13 个月。监测了整个试验周期内的球形浮球覆盖和无覆盖水体的蒸发过程；在蒸发强烈的暖季（2024.4-2024.9），增设了六棱钻石型浮体覆盖组进行同步观测，以对比不同几何结构的蒸发抑制差异。试验期间，同步监测了气温、相对湿度、风速等气象要素。

物理覆盖物覆盖水面通过形成物理屏障、反射太阳辐射等方式，干扰水分蒸发的能量供给和水汽输送过程，以减少蒸发<sup>[29]</sup>。通过设置空白组和对照原则，将覆盖措施的绝对效果转化为相对效果，从而排除环境干扰，科学地评估物理覆盖技术本身的有效性。根据《水面蒸发观测规范》（SL630-2013）<sup>[27]</sup>可知蒸发池内水体的蒸发量  $e$  为：

$$e = w_1 - w_2 + p \quad (1)$$

式中： $w_1$  表示上次蒸发池内水位测量值（mm）， $w_2$  表示本次蒸发池内水位测量值（mm）， $p$  表示两次数据测量时间段内降雨量（mm）。

根据公式 1，可计算月蒸发量  $E$  为：

$$E = \sum_{i=1}^n e_i \quad (2)$$

式中： $n$  表示每个月的天数， $e_i$  表示每次测量前后的蒸发量。

结合公式 1、公式 2 可得物理材料覆盖下水面蒸发抑制率  $\eta$  为：

$$\eta = \left( 1 - \frac{E}{E_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中： $E_0$  表示没有任何覆盖的空白组水体月蒸发量（mm）， $E$  表示各覆盖组水体月蒸发量（mm）。

## 2 结果

### 2.1 蒸发量与蒸发抑制率

浮体通过改变水—气界面的水汽压差、近水面风速以及水体热力学特性，直接调控水面蒸发速率。基于公式 1-公式 3，本研究在月尺度上对试验期内各蒸发池的水面蒸发量及蒸发抑制率进行了计算（见表 1）。结合表 1 与图 4 分析可知，空白对照组的蒸发量表现出显著的季节性敏感特征，而覆盖组的波动幅度相对平缓，致使蒸发抑制率呈现出明显的时间异质性。2023 年 9 月至 2024 年 8 月一年的观测期内，空白组蒸发池自由水面的年累积蒸发量为 2168.8 mm，该数据可为本地区平原水库等大水体蒸发量的估算提供可靠的参考依据<sup>[28]</sup>。

表 1 各月份蒸发量与蒸发抑制率

Tab.1 Monthly Evaporation Capacity and Evaporation Inhibition Rate

时间 (年-月)	不同覆盖类型下的月蒸发量 (mm)				不同覆盖类型下的月蒸发抑制率 (%)		
	均质浮球	配重浮球	六棱型浮体	空白组	均值浮球	配重浮球	六棱型浮体
2023-9	79.5	68.9	/	228.9	65.3%	69.9%	/
2023-10	54.9	47.8	/	167.1	67.1%	71.4%	/
2023-11	35.5	29.3	/	108.8	67.4%	73.1%	/
2023-12	17.4	15.4	/	57.3	69.6%	73.1%	/
2024-1	5.0	4.5	/	17.2	70.9%	73.8%	/
2024-2	4.2	3.7	/	14.6	71.2%	74.7%	/
2024-3	41.7	36.6	/	128.7	67.6%	71.6%	/
2024-4	66.1	59.3	47.1	199.8	66.9%	70.3%	76.4%
2024-5	109.9	98.5	74.2	308.4	64.4%	68.1%	75.9%
2025-6	115.8	107.6	80.2	317.5	63.5%	66.1%	74.7%
2024-7	124.6	117.0	88	350.3	64.4%	66.6%	74.9%
2024-8	95.6	89.7	68.2	270.2	64.6%	66.8%	74.8%
2024-9	74.1	69.4	53.2	209.2	64.6%	66.8%	74.6%

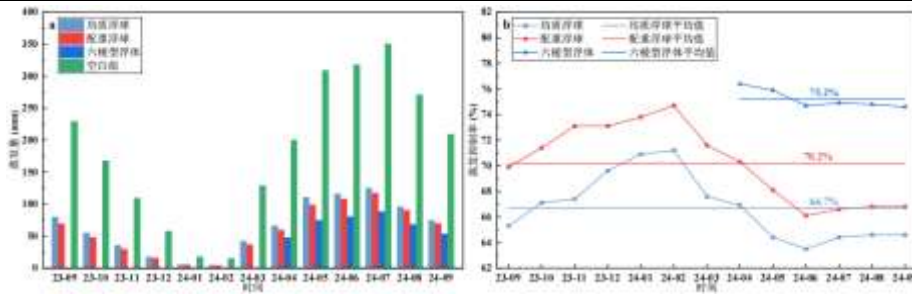


图 4 试验周期内各组水面蒸发量与蒸发抑制率比较: a.水面蒸发量; b.水面蒸发抑制率

Fig. 4 Comparison of water surface evaporation capacity and evaporation inhibition rate among different groups during the test period:

a. Water surface evaporation capacity; b. Water surface evaporation inhibition rate

监测数据显示,月蒸发量在平均气温最高的7月(28.6°C)达到峰值;然而,蒸发抑制率的最低值并未出现在此时,而是出现在蒸发量次高的6月。这一峰值错位现象揭示了物理材料覆盖水面后蒸发抑制机制的复杂性,并非仅由气温单一热力因子决定,而是大气温度、相对湿度、风速以及太阳辐射等多物理场协同驱动的结果<sup>[30]</sup>。其中,太阳辐射作为水体相变的主要能量来源,对蒸发过程起主导作用<sup>[31]</sup>。覆盖物通过截留短波辐射有效阻断了能量输入,从而抑制蒸发。然而,在辐射强烈的环境下,覆盖材料自身的辐射吸热升温效应可能与风速产生的湍流扩散相互作用,改变了局部微气候,进而导致抑制效率出现波动。

试验结果表明,配重浮球的平均蒸发抑制率为70.2%,而均质浮球较之降低了3.5%,且其抑制效果在整个观测周期内始终低于配重浮球。在试验后期的6个月中,引入了六棱钻石型浮体覆盖组,该构型展现出更优异的蒸发抑制性能。尽管该结构的表面覆盖率较球形浮体低3%,其平均蒸发抑制率却显著提升至75.2%。进一步的时间序列分析证实,该结构的月度蒸发抑制率持续高于同期的球形覆盖组,表明其在水面蒸发抑制方面具有显著优势。

覆盖物的几何构型与物理属性是决定水面蒸发抑制率的关键变量。试验表明,即便具备相同的几何尺寸和颜色,不同内部构造的浮球,其蒸发抑制效能仍存在显著差异。该现象主要归因于制造工艺存在差异,如,配重浮球通过底部增重设计显著降低了重心,从而在强风扰动下表现出优异的姿态稳定性,有效限制了浮球翻转运动,避免水下润湿表面频繁暴露于大气中,大幅减少了“润湿—蒸发”循环这一过程;此外,

浮球-面的微观粗糙度通过改变空气动力学特性调控蒸发过程，基于边界层理论，粗糙度差异决定了拖曳力系数，影响近表层湍流结构及浮球的自身运动（如漂移或自旋）。较高的粗糙度诱发了强湍流与旋转效应，破坏了水-气界面的饱和滞流层，加速了局部显热交换与水汽通量传输，最终削弱了蒸发抑制效果。

试验观察到，冬季结冰会极大地抑制水面蒸发，但无法完全阻止蒸发。这是由于在太阳辐射强烈的时段，冰面会直接向水蒸气转化产生升华现象，且也会有少许冰面存在冻融循环产生汽化，此外冰层下的液态水也在进行缓慢蒸发，通过冰层与蒸发池形成的边壁效应与外界发生交换，二者共同作用下造成水分的少量损失。因此，冬季蒸发是一个受抑制但持续存在的物理过程。

## 2.2 气象要素对蒸发抑制率的影响分析

气象数据对于分析试验现场水面蒸发的动态演变特征至关重要。水面蒸发是一个受气温、风速、太阳辐射及空气湿度等多重气象驱动因子综合作用的物理过程。以日为单位计算各月的大气温度、大气湿度以及风速平均值（图 5），以此与同期水面蒸发实测数据进行关联分析，能够有效揭示气象环境改变对蒸发过程的驱动机制，进而为区域水资源精细化管理及蒸发抑制策略的优化提供坚实的科学依据。

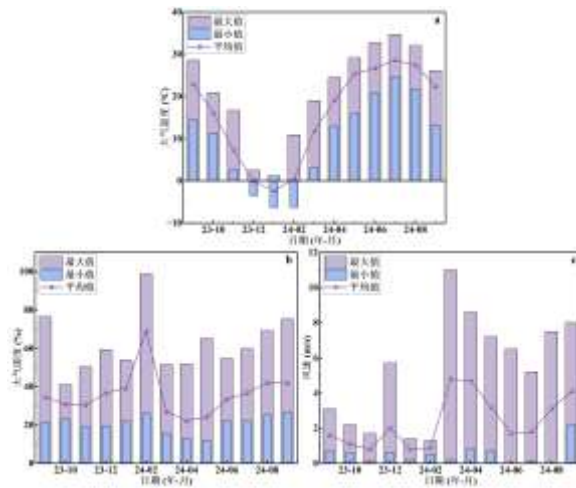


图 5 现场试验期间月尺度下的气象数据：a.大气温度；b.大气湿度；c.风速

Fig. 5 Monthly meteorological data during the field test: a. Atmospheric temperature; b. Atmospheric humidity; c. Wind speed

2023 年 9 月-2024 年 9 月平均气温在 $-2.4^{\circ}\text{C}$ - $28.6^{\circ}\text{C}$ 之间，气温最值出现在 1 月和 7 月份，大气湿度峰值出现在 2 月份，冬季大风天气较少，春季 3 月份风速最大。在三者的共同作用下，水域的蒸发过程会受多因子耦合控制，气温主导潜在蒸发能力的季节性变化，湿度决定蒸发速率的即时释放程度，而风速主导蒸发的瞬时增强效应。

结合图 4 可知，蒸发抑制率呈现显著的季节性差异，在 2 月份达到峰值，而 6 月和 7 月则处于较低水平。2 月份的蒸发抑制率最高主要归因于该时段处于研究区的封冻期，此时相对湿度达年度峰值，大气温度和风速均处于较低水平；更为关键的是，冰盖的物理屏障效应大大削弱了未覆盖区水体与大气间的能量及水汽交换，有效限制了水分子向大气的扩散。这种低蒸发量与高蒸发抑制率并存的现象，与 Han 等<sup>[32]</sup>在封冻期的观测结果相一致，进一步验证了冰冻层对蒸发过程的显著抑制作用。

相比之下，6 月和 7 月蒸发抑制率较低主要由于强烈的气象驱动力。这一时期，研究区气温处于全年高位（7 月温度最高，6 月也处于较高水平），高温显著增加了水面与大气之间的饱和水汽压差，且强烈的太阳辐射导致潜热通量显著增加。加之干燥空气与风速诱发的湍流扩散作用，极大地增强了水分子的动能及向大气的输送能力。这种高强度的蒸发潜力和大气需水能力，削弱了物理覆盖物的相对有效性，从而导致该时段的蒸发抑制率处于较低水平。

这种动态变化不仅反映了区域大气过程的演变规律，也对水体能量收支、水资源管理及生态水文响应

具有重要影响。整体上，本研究中的水面蒸发强度表现为由强到弱再到强的发展趋势，而蒸发抑制效果则是表现出由弱到强再到弱的过程，这体现了气象要素协同变化对蒸发和蒸发抑制过程的综合调控作用。

### 2.3 覆盖物对水质的影响

为评估覆盖材料对水体水质的影响，本研究分别于 2023 年 12 月与 2024 年 8 月采集水样，并送至专业机构依据农业用水标准进行分析。采样范围涵盖均质浮球覆盖组、配重浮球覆盖组、空白对照组及水源处水体，具体检测结果详见表 2。鉴于六棱形浮体布置在首次采样之后，为确保两期监测数据的一致性与可比性，第二次水质检测未将该处理组纳入监测范围。

水质检测结果（表 2）表明，浮球覆盖技术具有良好的环境相容性。监测数据显示，浮球覆盖并未对水体产生负面干扰，反而展现出一定的水质保护效应。各试验组的硫化物及砷等指标均处于极低水平或低于检测限，各项毒理学指标均远低于安全阈值。覆盖层构筑的物理屏障有效阻隔了大气粉尘与颗粒物的沉降。数据显示，2024 年 8 月空白对照组的化学需氧量（以下简称：COD）升至 44 mg/L，而覆盖组仅为 15-17 mg/L，显著降低了外源性污染输入，且对水体溶解氧环境无明显不利影响。除空白组在试验后期因强烈蒸发浓缩导致全盐量（1060 mg/L）略有超标外，其余覆盖组的 pH 值、悬浮物、全盐量、COD 及氯化物等关键指标均严格符合《农田灌溉水质标准》（GB 5084-2021）的要求<sup>[33]</sup>，完全可作为农业用水进行作物灌溉。

表 2 水质检测结果

Tab.2 Water Quality Test Results

检测项目	2023 年 12 月水样				2024 年 8 月水样				单位
	均值	配重	空白组	水源处	均值	配重	空白组	水源处	
	浮球组	浮球组			浮球组	浮球组			
PH 值	8.0	7.9	8.1	8.1	8.6	8.4	8.6	8.4	无量纲
悬浮物	2	10	8	5	9	8	10	4	mg/L
全盐量	439	514	574	541	628	586	1060	281	mg/L
COD	9.03	7.52	10.5	6.02	17	15	44	13	mg/L
氯化物	83	115	124	143	140	121	257	36	mg/L
硫化物	0.01L	0.01L	0.01L	0.01L	0.01L	0.01L	0.01L	0.01L	mg/L
砷	0.0008	0.0003L	0.0003L	0.0006	0.0007	0.0005	0.0006	0.0008	mg/L

注：“L”表示低于方法检出限。

## 3 讨论

### 3.1 不同结构覆盖物优缺点评价

当六棱钻石型浮体维持理想的致密排列（边对边、角对角）时，在节水率上明显优于紧密排列的浮球，但将其置于真实水库的复杂运行环境中，该构型面临着诸多工程挑战：如极端风浪条件下该结构易发生堆叠与侧翻，导致覆盖层完整性受损及蒸发抑制效果下降，且风浪平息后难以恢复原状，大幅增加了运维难度与成本；浮体自身棱角较多，长期使用过程中相互碰撞易产生应力集中，加速了材料疲劳与破损；全覆盖模式下若遇故障或事故，行船维修困难，且在水位大幅波动时，易在岸坡搁浅并难以随水位回升而复原。

相比之下，尽管浮球在静水及边壁约束条件下的蒸发抑制效果虽没有六棱型浮体理想。但凭借其独特的球体几何特征，在实际工程应用中展现出更优的综合效益：无论是水位涨落导致的搁浅还是风浪引起的堆叠，当外部环境稳定后浮球均能自动散开恢复原位；球形结构有效避免了碰撞、摩擦中的应力集中效应，在抗紫外线、干湿循环及冻融交替等环境应力下具有更长的使用寿命；铺设和运行过程中能够节省大量人工成本，铺设时可通过自卸车倾倒入水体，形成的铺盖水面可自由行船，这样便大幅降低了前期投入与全生命周期的运行维护成本。

六棱型浮体虽在静水条件和理想状态下具有更高的蒸发抑制率，但在等壁厚与同尺寸条件下，其抵抗外载荷强度、抗风浪堆叠稳定性及自恢复能力均不及浮球。关于两者在节水效率与工程可靠性之间的权衡，仍需在未来的长周期试验与实际应用中进一步量化验证与完善。

### 3.2 对水质与蒸发影响分析

在长期运行条件下，覆盖物表面受环境因素影响呈现出显著的局部性状改变。六棱型浮体由于其表面构造特性，易积聚颗粒物，导致未覆盖间隙区域滋生绿藻（图 6 a）。若此类区域藻类过度繁殖，将阻碍水—气界面交换，导致溶解氧水平下降，进而对水体生态环境造成负面影响。相比之下，浮球的光滑球面结构不易附着积尘，且在三点接触的紧密堆积状态下，球体间仍保留了特定的空隙结构。该结构维持了水体与大气的接触界面，促进了气体交换与水体自净过程，试验中在浮球覆盖组没有观测到有绿藻滋生。鉴于藻类群落演替的复杂性与随机性，且需要长期连续监测，本试验暂未针对藻类等生物进行定量观测分析。缺乏其定量数据是本研究的局限之一，但上述定性发现明确了后续关于覆盖层对水生生物生态效应影响的研究需求。

此外，水温虽是调控溶解氧、微生物活性及化学反应速率的关键生态参数，但本研究的核心目标在于精确量化物理覆盖对水面蒸发的抑制效率，试验设计重点关注水气交换过程。研究优先保障了蒸发量及其主要气象驱动因子的精确获取，暂未布设水温监测网络。尽管未直接测量水温，但溶解氧等关键水质指标的测量已为覆盖层引起的热环境改变提供了有力的间接证据。缺乏高分辨率的水温数据限制了对覆盖层下水体热结构演变的深层机制解析，这既是当前研究的不足，也为未来的工作指明了方向，即需引入精细化的水温监测手段以深入探究覆盖下的热动力学过程。

在长期运行过程中，浮球底部浸水区域会出现钙化沉积现象，如图 6 b 展示了在吐鲁番某水库运行 9 年后的浮球样本，可见其底部附着了显著的钙化层，目前未对其化学成分进行化验和定量分析，但并未观测到该沉积物对水质造成污染。物理性质上，该钙化层结构致密且坚硬，附着于浮球表面形成了一道物理屏障，反而有效阻断了水分的毛细上升通道。相比之下，六棱型浮体表面更易捕获和积聚沙尘等大气颗粒物，特别是在浮体边缘的接触区域，沉积物极易吸湿饱和。在毛细驱动力的作用下，这些湿润的积尘层显著增加了有效蒸发面积与蒸发速率，从而导致覆盖系统的整体蒸发抑制效率下降（图 6 c）。

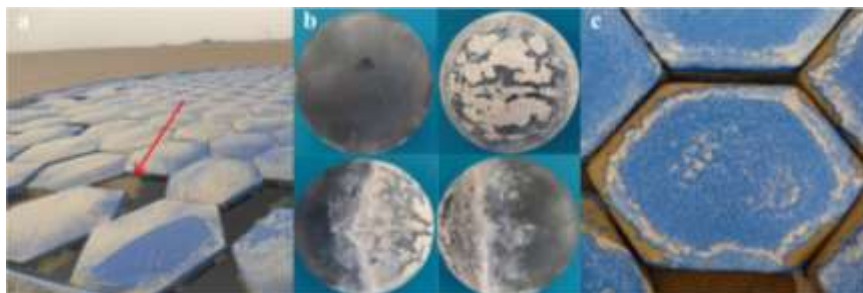


图 6 长期运行下覆盖物表面状：

a. 空白区域发现绿藻；b. 使用 9 年浮球表面钙化现象；c. 六棱型浮体边壁接触处出现大量沙尘堆积

Fig. 6 Surface conditions of coverings under long-term operation: a. Green algae found in blank areas; b. Calcification on the surface of floating balls used for 9 years; c. A large amount of sand and dust accumulation at the contact points of the side walls of hexagonal floating bodies.

### 3.3 经济性分析

在水资源极度匮乏的干旱、半干旱地区，经济适用性是抑制蒸发技术在实际工程应用的重要考量指标。投入产出比作为量化技术经济性的核心参数，直接反映了资本投入转化为水资源效益的效率。优化投入产出比意味着在满足工程预期目标前提下，实现了生态效益与经济效益双赢。

在理想状态下，球形浮体以三点紧密排列所形成的单位覆盖率为 91%<sup>[34]</sup>，表明相应水域单位面积上所有球体最大截面投影面积之和为 0.91 m<sup>2</sup>。据此可计算出，单位面积水域容纳的浮球数量为 115.9 个；六边形浮体以蜂巢式紧密排列进行铺设，理论覆盖率可 99%，即单位面积水域可容纳 7.6 个六边形浮体。通过与厂家采购合同，我们获得了 3 种浮体的平均价格，并以此为依据计算了单位面积的铺设费用(表 3)。

二期水库为例，正常蓄水位对应水面面积为 93.6×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>，十四师 224 团综合用水价格为 0.51 元/m<sup>3</sup><sup>[35]</sup>。理想状态下铺设，若不考虑人工铺设成本，均质浮球、配重浮球与六棱钻石型浮体的初期投资分别为 8678.6

万元、9329.1 万元和 33433.9 万元。由于实际工程中难以达到理论覆盖率，实际材料成本将有所降低。

表 3 单位面积浮体铺设初步投入

Tab.3 Initial Investment in Floating Body Paving per Unit Area

浮体类型	单位面积铺设个数	单价/元	总价/元
均质浮球	115.9	0.80	92.72
配重浮球	115.9	0.86	99.67
六棱钻石型浮体	7.6	47.00	357.20

基于 2023 年 9 月至 2024 年 8 月实测年蒸发量 2168.8 mm，结合试验期间各覆盖材料的平均蒸发抑制率估算，在理想覆盖条件下，三种浮体对应的年节水量分别约为  $143.3 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $150.8 \times 10^4 \text{m}^3$  和  $182.1 \times 10^4 \text{m}^3$ 。浮体设计使用年限为 30 年，并假设期间不发生维护等附加成本，其纯节水效益依次为 2192.1 万元、2307.1 万元和 2785.9 万元。

据此计算，均质浮球、配重浮球与六棱钻石型浮体的投入回收比分别为 25.25%、24.73% 和 8.34%。从经济性角度分析，均质浮球在当前条件下为较优选择。针对六棱型浮体材料成本偏高的问题，目前正进行结构优化，预计改进后单体成本可降低 50% 以上，但其蒸发抑制性能尚需进一步验证。

### 3.4 材料选择建议

防蒸发覆盖工程的选材与质量检验，是保障工程长期安全运行、提升蒸发抑制率的关键前提。在材料选择方面应优先采用高密度聚乙烯，该材料在国内外水利、建筑及水产等领域已有几十年的成功应用历史，其无毒性、耐腐蚀及出色的耐久性已得到充分验证与广泛认可<sup>[36]</sup>。

除关注原材料本身的理化性质外，加工过程的工艺管控同样关键。招标文件中应明确规范供应商需出具详尽的第三方材料检测报告，重点审查抗紫外线老化、抗冲击强度及耐环境应力开裂等关键性能指标。

物理覆盖单元的壁厚均匀度是质量验收的控制要点。壁厚分布不均会导致局部应力强度不足，在长期的风浪荷载与环境应力作用下极易诱发结构失效，进而缩短使用寿命。因此，构建材料溯源、生产工艺监督及成品质量检测的闭环控制体系，是保障物理覆盖防蒸发技术实现长期节水效益与经济效益的基础。

## 4 结论

本研究依托直径 6 m 的大型蒸发池，设置了两种球形浮体覆盖组及六棱钻石型浮体覆盖组，并以无覆盖水面作为空白对照。系统地探究了不同几何构造覆盖物对水面蒸发过程的调控机制与抑制水面蒸发效果，并同步评估了其对水体水质的潜在影响。主要结论归纳如下：

(1) 浮体覆盖条件下的水面蒸发过程及抑制效果表现出显著的季节性差异。不同结构浮体的节水效果差异明显，在 86% 的表面覆盖率下，均质浮球与配重浮球的平均蒸发抑制率分别为 66.7% 和 70.2%。相比之下，六棱钻石型浮体在 83% 的较低覆盖率下，实现了 75.2% 更高的蒸发抑制率，展现了更好的效果；

(2) 浮球、六棱钻石型浮体等覆盖技术兼具节水、抑制水体矿化度浓缩、缓解水库淤积与改善水质的多重效益。实际应用表明，该技术通过减少水面蒸发，从而可抑制水体矿化度浓缩（如含盐量），有效降低风吹沙引起的水中悬浮物和泥沙含量增加，缓解水库淤积。长期覆盖下的水体经检测，其关键指标均稳定符合国家农业灌溉水质标准，这为其在水利工程中的大规模推广应用提供了重要的环境安全依据；

(3) 在不考虑水面铺设施工与后期运维成本，并假设处于理想全覆盖工况的情况下，对各方案进行经济效益评估显示，均质浮球、配重浮球及六棱钻石型浮体的静态投资回收比分别为 25.25%、24.73% 和 8.34%；

(4) 从综合效益方面出发，球形结构和六棱型浮体结构在节水效果和经济适用性方面各具优势。实际工程中应根据场景需求、资金预算和环境条件等选择合适的覆盖方案，以实现水资源可持续利用和经济效益最大化。

## 4 参考文献

[1] 吴丹,陈江南.协同治理视角下中国水治理效能的演变特征与贡献测量.水资源保护,2025,41(05):268-277.

Wu D,Chen J N.Evolutionary characteristics and contribution measurement of China's water governance effectiveness from the

- perspective of collaborative governance. *Water Resources Protection*, 2025, 41(05): 268-277.
- [2] Boretti A, Rosa L. Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2019, 2(1): 15.
- [3] 何凡,路培艺,尹婧,等.中国水资源空间均衡评价与空间关联性分析. *水资源保护*, 2023, 39(03): 148-155.  
He F, Lu P Y, Yin J, et al. Spatial equilibrium evaluation and spatial correlation analysis of water resources in China. *Water Resources Protection*, 2023, 39(03): 148-155.
- [4] 李原园,李云玲,郭旭宁,等.1956—2016年中国水资源总量时空分布规律及变化特征. *水科学进展*, 2025, 36(01): 18-27.  
Li Y Y, Li Y L, Guo X N, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of water resources in China during 1956—2016. *Advances in Water Science*, 2025, 36(01): 18-27.
- [5] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略. *地理学报*, 2018, 73(07): 1189-1203.  
Deng M J. "Three Water Lines" strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(07): 1189-1203.
- [6] Huo W, Zhi X, Hu S, et al. Refined assessment of potential evapotranspiration in the tarim basin. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 904129.
- [7] Du L, Wong J S, Li Z, et al. Hydroclimatic Change in Turpan Basin under Climate Change. *Water*, 2023, 15(19): 3422.
- [8] 韩克武,侍克斌,严新军,等. PE 浮球覆盖下干旱区平原水库防蒸发节水效率分析. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(02): 376-385.  
Han K W, Shi K B, Yan X J, et al. Analysis on Water Saving Efficiency of PE Spheres Covering Plain Reservoirs in Arid Area. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(02): 376-385.
- [9] 倪明霞,普拉提·莫合塔尔,孙婷宇,等.基于气候变化与人类活动双重作用的南疆水资源供需关系分析. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(02): 331-348.  
Ni M X, Polat M, Sun T Y, et al. Analysis on the Supply-demand Relationship of Water Resources Based on the Dual Role of Climate Change and Human Activities in Southern Xinjiang, China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(02): 331-348.
- [10] Biemans H, Haddeland I, Kabat P, et al. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water resources research*, 2011, 47(3).
- [11] Jansen F A, Teuling A J. Evaporation from a large lowland reservoir - (dis) agreement between evaporation models from hourly to decadal timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(3): 1055-1072.
- [12] 董颖,杜军凯,俞发康,等.1960—2020年千岛湖流域蒸散发演变特征及驱动因素解析. *湖泊科学*, 2024, 36(3): 901-912.  
Dong H, Du J K, Yu F K, et al. Evolution characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Lake Qiandao Basin from 1960 to 2020. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 24(3): 1055-1072.
- [13] 孔晓乐,杨永辉,曹博,等.永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析. *环境科学*, 2021, 42(09): 4202-4210.  
Kong X L, Yang Y H, Cao B, et al. Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin. *Environmental Science*, 2021, 42(09): 4202-4210.
- [14] Bakhtiar M, Aminzadeh M, Taheriyoun M, et al. Effects of floating covers used for evaporation suppression on reservoir physical, chemical and biological water quality parameters. *Ecohydrology*, 2022, 15(8): e2470.
- [15] Hao G, Shi K B, Han K. Evaluating the impact of floating spheres on evaporation reduction and water salinity control in reservoirs. *Agricultural Water Management*, 2025, 312: 109440.
- [16] Wang S, Shi K, Han K, et al. Influence of wetted perimeters variation of physical cover porosity on the evaporation suppression effect of plains reservoirs in arid zones. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 61: 102734.
- [17] Abdallah A M, Parihar C M, Patra S, et al. Critical evaluation of functional aspects of evaporation barriers through environmental and economics lens for evaporation suppression-A review on milestones from improved technologies. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147800.
- [18] Shalaby M M, Nassar I N, Abdallah A M. Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126482.
- [19] Ruskowitz J A, Suárez F, Tyler S W, et al. Evaporation suppression and solar energy collection in a salt-gradient solar pond. *Solar Energy*, 2014, 99: 36-46.
- [20] 韩克武,侍克斌,杨云鹏,等.配重浮球覆盖下干旱区平原水库节水率研究. *干旱区地理*, 2020, 43(03): 644-651.  
Han K W, Shi K B, Yang Y P, et al. Water saving efficiency of weighted floating balls covering plain reservoir in arid area. *Arid Land Geography*, 2020, 43(03): 644-651.
- [21] Mady B, Lehmann P, Or D. Evaporation suppression from small reservoirs using floating covers—Field study and modeling. *Water Resources Research*, 2021, 57(4): e2020WR028753.
- [22] Hao G, Han K, Shi K. Effect of floating balls on evaporation inhibition, surface energy balance and biological water quality parameters at different coverage fractions. *Agricultural Water Management*, 2023, 287: 108460.
- [23] 王绍磊,侍克斌,韩克武,等.静水条件下3种不同几何形状的圆形结构覆盖物对水面防蒸发影响. *节水灌溉*, 2025, (10): 63-69.  
Wang S L, Shi K B, Han K W, et al. The Effect of Three Different Geometric Shapes of Circular Structural Covers on Water Surface Evaporation Prevention Under Still Water Conditions. *Water Saving Irrigation*, 2025, (10): 63-69.
- [24] Rezazadeh A, Akbarzadeh P, ShahMardan M M, et al. A Novel Method for Assessing Evaporation in Small Water Bodies: Considering Floating Covers, Water Surface Flows, and Wind Speeds. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2025: 1-22.
- [25] 袁也,武文丽,付宗驰,等.新疆和田玉市生态安全评价及其时空分异特征研究. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(06): 733-740.  
Yuan Y, Wu W L, Fu Z C, et al. Spatial-temporal discrimination for the urban eco-security evaluation in Xinjiang Kunyu. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2021, 39(06): 733-740.
- [26] 王旭,严新军,李少恒,等.对大水体浮球覆盖的节水率及结构稳定性分析. *人民黄河*, 2025, 47(10): 133-138+146.  
Wang X, Yan X J, Li S H, et al. Analysis of Water-Saving Rate and Structural Stability Under Floating Ball Coverage on Large Water Bodies. *Yellow River*, 2025, 47(10): 133-138+146.
- [27] 中华人民共和国水利部. 水面蒸发观测规范: SL630-2013. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [28] 王永亮,张学知,乔光建.河北省平原区 20m<sup>2</sup>水面蒸发池与不同型号蒸发器折算系数分析. *水文*, 2012, 32(04): 58-62.  
Wang Y L, Zhang X Z, Qiao G J. Conversion Coefficient Analysis of 20m<sup>2</sup> Evaporation Pond and Other Evaporators for Hebei Plain. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(04): 58-62.

- [29] Jiang H, Tang K, He X. Experimental studies on reduction of evaporation from plain reservoirs in drought areas by benzene board covering technology. *Journal of Coastal Research*, 2015 (73): 177-182.
- [30] Davarzani H, Smits K, Tolene R M, et al. Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface. *Water resources research*, 2014, 50(1): 661-680.
- [31] Condon L E, Atchley A L, Maxwell R M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nature communications*, 2020, 11(1): 873.
- [32] Han K W, Shi K B, Yan X J, et al. Water savings efficiency of counterweighted spheres covering a plain reservoir in an arid area. *Water resources management*, 2019, 33(5): 1867-1880.
- [33] 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局.农田灌溉水质标准(GB 5084-2021).北京:中国环境出版集团,2021.
- [34] Lehmann P, Aminzadeh M, Or D. Evaporation suppression from water bodies using floating covers: laboratory studies of cover type, wind, and radiation effects. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 4839-4853.
- [35] 王步之.EPS 浮球直径优选及其覆盖下干旱区平原水库防蒸发节水率研究[学位论文].新疆农业大学,2023. (66-67)  
Wang B Z.Study on the Optimal Diameter of EPS Floating Ball and the Evaporation Suppression Efficiency on Plain Reservoirs in Arid Areas under Its Coverage[D]. Xinjiang Agricultural University,2023.(66-67)
- [36] Craciun D C, Peter I. Review of the polymeric material composite, optimization for industrial application. *Acta Marisiensis, Seria Technologica*, 2024, 21: 47-51.