doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.061

不同覆盖方式下水面抑蒸率及其与水-气温差关系研究

范军亮[1,2]　邓新炜[1]　王佳玉[1]　白振涛[1]　聂建阳[1]　李云霞[2]　尹飞虎[2]

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100;
2.新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所,石河子 832000)

摘要:西北旱区平原水库和蓄水池面积广、水位浅、蒸发大,无效蒸发损失加剧了农业水资源紧缺程度,物理覆盖是减少水面蒸发损失的有效途径。本文系统研究了不同覆盖产品(浮球、正六边形浮盖、正六边形浮板和矩形浮板)、覆盖率(约 50%、70% 和 90%)和铺设方式(集中和分散)下水面抑蒸率及其与近水面空间体温度的关系。结果表明,覆盖率是影响水面抑蒸率的主要因素,与蒸发量呈负相关,与单位裸露面积蒸发量呈正相关。不同覆盖产品和铺设方式的抑蒸率分别相差 0.39 ~ 6.65 个百分点和 1.37 ~ 7.40 个百分点,覆盖率约 70% 下不同覆盖产品抑蒸率基本可达 50%,其中集中铺设正六边形浮盖、矩形浮板、正六边形浮板抑蒸效果更好。覆盖产生的热聚集效应促使日间水面温度上升,增大覆盖率和集中铺设通过热量再分配机制减小水-气温差,增大不同水层温差可削弱蒸发驱动力进而提升水面抑蒸率。研究结果可为水面覆盖抑蒸产品研发及推广应用提供理论依据和技术支撑。

关键词:水面蒸发;覆盖率;覆盖面积;水体温度;水-气温差

中图分类号:TV697　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0708-10　　**OSID**:

Water Evaporation Suppression Rates and Their Relationships with Water – Air Temperature Difference under Various Coverage Modes

FAN Junliang[1,2]　DENG Xinwei[1]　WANG Jiayu[1]　BAI Zhentao[1]　NIE Jianyang[1]　LI Yunxia[2]　YIN Feihu[2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Institute of Farmland Water Conservancy and Soil Fertilizer*, *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: The plain reservoirs and irrigation ponds in the arid northwest regions of China are characterized by large surface area, shallow water level, and high water evaporation, where ineffective evaporative losses significantly exacerbate the scarcity of agricultural water scarcity. Physical coverage has been proven to be an effective approach to reduce water evaporation. The water evaporation suppression rates and their relationship with the near-surface air/water temperatures under various coverage products (floating balls, hexagonal floating covers, hexagonal floating plates, and rectangular floating plates), coverage rates (approximately 50%, 70%, and 90%), and layout patterns (concentrated and dispersed) were systematically investigated. The results demonstrated that coverage rate was the dominant factor in water evaporation suppression, showing a negative correlation with total evaporation but a positive correlation with evaporation per unit exposed area. The evaporation suppression rates varied from 0.39 percentage points to 6.65 percentage points across different coverage products and from 1.37 percentage points to 7.40 percentage points between layout patterns. At approximately 70% coverage rate, all coverage products achieved 50% evaporation suppression rate, with concentrated hexagonal floating covers, rectangular floating plates, and hexagonal floating plates performing better. The thermal accumulation effect induced by coverage increased daytime water surface temperature. High coverage rates and concentrated layout pattern reduced the water – air temperature gradient through heat redistribution while enhancing inter-layer water temperature differences, thereby weakening evaporation

收稿日期:2025-03-19　修回日期:2025-06-04

基金项目:新疆生产建设兵团 NYHXGG 项目(2023AA305)

作者简介:范军亮(1985—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉排水新技术研究,E-mail:nwwfjl@163.com

通信作者:李云霞(1984—),女,副研究员,主要从事农业水资源高效利用研究,E-mail:243661616@qq.com

drivers and improving suppression rates. The research result can provide theoretical basis and technical support for developing and applying evaporation-suppressing coverage products in water conservation practices.

Key words: water surface evaporation; coverage rate; coverage area; water temperature; water − air temperature difference

0　引言

新疆是我国水资源短缺最为严重的地区之一，干旱少雨（年平均降水量 93 ~ 206 mm），蒸发强烈（800 ~ 3 200 mm）[1-3]。2022 年新疆生产建设兵团（以下简称兵团）农业用水量占总用水量的 90.4%，灌溉水有效利用系数为 0.585，虽高于全国平均值 0.565，但与发达国家 0.7 ~ 0.8 相比还有差距。兵团多采用渠道自河道远距离输水、平原修建水库和水池蓄水的方式引水灌溉。现有水库 149 座，其中平原水库占比约 88%，总库容 3×10^9 m^3，水库面积大、水位浅、蒸发大，水面蒸发损失量约占总库容的 25%（8×10^8 m^3），无效蒸发损失大大降低了水库有效利用率，加剧了农业水资源紧缺程度。兵团田间节水空间越来越小，但灌溉水源和输配水过程中节水潜力仍有较大提升空间[4-6]。

水面覆盖是干旱区灌溉水源抑蒸降损的重要措施，主要包括化学试剂法、生物改良法、风障遮挡法和物理覆盖法。化学试剂法通过连接具有亲水、疏水双极性分子结构的单分子有机膜（如乙二醇单十八烷醚、十六醇复配单分子膜），阻止气化水分子逸出水面从而达到抑蒸目的，但其稳定性随时间衰减[7-9]。生物改良法通过种植水生植物覆盖水体表面，减少水面与大气接触，降低蒸发，但抑蒸效率低，效果并不理想[10]。风障遮挡法利用水体周围林木、建筑设施等减少水面与空气接触，从而限制水体的蒸发能力，但不适用于大水体的水面抑蒸[11]。相较而言，物理覆盖法是研究较为深入、成效更为显著的技术。物理覆盖法通过覆盖产品遮挡水面，减少太阳辐射从而降低水面温度，减少近水面水体与大气接触，降低饱和水汽压差从而达到抑蒸效果，因其抑蒸好、成本低等优点得到广泛应用。

在国外，SEGAL 等[12]使用一种遮阳伞式浮子覆盖水面，发现半覆盖可以达到理想的抑蒸效果；HASSAN 等[13]评估了模块化浮动产品对冬至-夏季 6 个月澳大利亚沿海及干旱地区的抑蒸效果；美国加利福尼亚州向水库投放约 9.6×10^7 个浮球来减少水库水面蒸发，但其抑蒸效果有待进一步研究；对于抑蒸效果，也有研究从温度和能量分配角度阐明不同影响因素与不同颜色、大小和材料的浮球及其他材料抑蒸效果之间的关系[14-15]。在国内，严新军[16]最早在新疆水库开展了不同连接、固定方式下聚苯乙烯泡沫塑料板的抗风浪效果；武金慧[17]分析了聚苯乙烯泡沫塑料板、聚乙烯软片和石蜡覆盖水库水面的防蒸发效果；张永山等[18]研究了风速、塑料板湿润面积对抑蒸效果的影响；姜海波等[19]通过蒸发池苯板覆盖抑蒸试验，结合能量平衡原理和彭曼公式建立了冰冻期与非冰冻期抑蒸计算模型；韩克武等[20]研究了不同风速下不同覆盖面积（1、2、3、4 m^2）的 PE 浮球抑蒸效果。虽然前人已对浮球或苯板的抑蒸效果进行了广泛研究，但针对不同覆盖产品（如浮球、正六边形浮盖、正六边形浮板和矩形浮板），特别是不同覆盖率和铺设方式下水面抑蒸率还缺乏系统对比研究；此外，虽有研究关注 0 ~ 1 m 水体接收辐射温度变化，但未从覆盖产品辐射影响下近水面大气和表水层能量传递及温度变化角度明确抑蒸效果与温度的关系。因此，本文研究不同覆盖方式（4 种覆盖产品、3 种覆盖率和 2 种铺设方式）下水面抑蒸率及其与近水面空间体温度（水面以上 5 cm 大气温度、水面温度、水面以下 5 cm 温度）的关系，以期为水面覆盖抑蒸产品研发及推广应用提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地点位于兵团第三师图木舒克市 49 团 18 连院士科研试验基地（39°50′36″N，78°47′15″E），该基地位于天山南麓、塔克拉玛干沙漠西缘，属暖温带大陆性干旱气候，热量丰富、光照充足、无霜期长、昼夜温差大、降水稀少、湿度小、蒸发强、光热资源丰富。全年平均气温 12.1℃，极端高温 42.2℃，极端低温 −24.2℃，年均无霜期 225 d 左右，年均日照时数约 3 000 h，年均降水量 56 mm，年均水面蒸发量 2 030 mm，年均风速 1.8 m/s，最大风速 18.2 m/s。

1.2　试验材料

基于前人研究和市场调研，选取浮球、正六边形浮盖、正六边形浮板和矩形浮板 4 种水面覆盖产品，其中浮球直径 10 cm，正六边形浮盖边长 9.5 cm、高 2 cm，正六边形浮板边长 9.5 cm、高 5 cm，矩形浮板长 100 cm、宽 50 cm、高 5 cm。浮球作为常用水面覆

盖产品,连接方式简易,碰撞缓冲降损效果明显;正六边形浮盖可通过拼接达到水面接近全覆盖目的,其表面凹槽在积水后也可增加材料自重,增强材料稳定性,但拼接整体受风浪影响后恢复性较差;正六边形浮盖与正六边形浮板外观尺寸相同,但表面平整无凹槽,无法积水增重增强稳定性,但保留了拼接特性,且抑蒸效果不受影响,相较于正六边形浮盖侧面高度增加,不易叠加;矩形浮板可通过拼接组合、连接等方式达到高覆盖率效果,且连接体系稳定,虽增强浮板与水的粘附力,但在强风浪环境下因受力面积增加,反而更易脱离水体。

1.3 试验设计

搭建 21 个长、宽、高分别为 2 m×2 m×1 m 的立方体储水容器作为蒸发器,按 2 m 等间距排列组成 7 个处理,采用完全随机区组设计,每个处理重复 3 次,共计 21 个蒸发器(7 处理×3 重复)。蒸发器采用随机排列方式布设,以消除空间位置对蒸发量的潜在影响。蒸发器内外采用双层刀刮布防止渗漏,试验场四周空旷无遮挡。试验用水来自小海子水库,蒸发器注水至距离顶部外沿 5 cm 处,即水位高 95 cm。

设置不同覆盖方式:覆盖产品、覆盖率和铺设方式,分别以 FB、HFC、HFP、FP 和 CK 表示浮球、正六边形浮盖、正六边形浮板、矩形浮板和无覆盖处理;以 1、2 和 3 后缀分别表示 3 种覆盖率(约 50%、70% 和 90%);以 E、I 前缀分别表示 2 种铺设方式(集中、分散)。为尽可能保证覆盖率接近,已知浮球在无边界条件下理论覆盖率为 91%[21],设置各处理覆盖率 3 接近 90%,其中 FP3 裁切取 90%;集中铺设下覆盖产品之间紧密连接,分散铺设下覆盖产品随机覆盖水面,各处理实际覆盖率见表 1。

表 1 不同处理实际覆盖率

Tab. 1 Actual coverage rate in various treatments

处理	FB1	E/IFB2	FB3	FP1	E/IFP2	FP3	HFC1	E/IHFC2	HFC3	HFP1	E/IHFP2	HFP3
覆盖率/%	43.0	63.6	88.2	47.0	69.0	90.0	46.1	66.4	82.1	46.1	66.4	82.1

由于各梯度下产品覆盖率接近(相差 1.8 ~ 5.4 个百分点),同一梯度统一作为相同覆盖率分析。设置 4 组试验研究不同覆盖方式对水面抑蒸率的影响(表 2)。试验时间为 2023 年 7 月 26 日—8 月 31 日,该时间段为试验区日蒸发量最大时期,以试验先后顺序分别开展为期 7 d 的水面蒸发量观测;其中,试验 1、2 区别于试验 3、4 的集中、分散铺设方式,采取自然漂浮并设置多级覆盖率。

表 2 试验处理

Tab. 2 Experimental treatments

序号	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7
1	HFC1	FB1	HFC2	FB2	HFC3	FB3	CK
2	FP1	HFP1	FP2	HFP2	FP3	HFP3	CK
3	EFP2	IFP2	EFB2	IFB2	EHFP2	IHFP2	CK
4	EHFC2	IHFC2	EHFP2	IHFP2	EFB2	IFB2	CK

1.4 数据观测

蒸发量观测主要通过 HOBO U20-001-04-Ti 型水位数据记录仪(Onset 公司,美国)实现,采用压力传感器换算水位,将该传感器固定至接近池底的池壁处(图 1),记录时间间隔为 1 h。同时,每日 20:00 使用 SCM60 型水位测针人工读取水位,每 7 d 取末位日当天 20:00 水位数据记录仪换算数据,二者数据进行核对,采用 HOBO MX2201 型水温数据记录仪(Onset 公司,美国)记录水面以上 5 cm 处大气温度、水面温度、水面以下 5 cm 处水体温度(图 1),数据记录时间间隔 2 h,测量时间为 08:00—22:00。采用 Davis Vantage Pro2 型小型气象站(Davis 仪器公司,美国)记录逐日气象数据,试验期间气象数据统计见表 3。

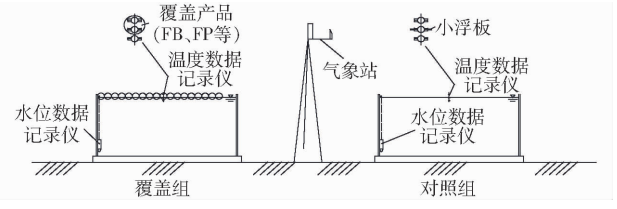


图 1 试验装置布设示意图

Fig. 1 Setup of experimental devices

表 3 试验期间气象数据统计

Tab. 3 Statistical summary of meteorological variables during experimental periods

时期	风速/(m·s^{-1})	相对湿度/%	气温/℃
7 月 26 日—8 月 1 日(试验 1)	3.42 ± 1.07	46.71 ± 18.30	26.50 ± 5.02
8 月 4 日—8 月 10 日(试验 2)	3.67 ± 1.12	51.46 ± 17.90	26.42 ± 5.25
8 月 11 日—8 月 17 日(试验 3)	3.62 ± 1.30	43.28 ± 17.22	25.67 ± 5.15
8 月 25 日—8 月 31 日(试验 4)	1.87 ± 0.95	52.16 ± 19.26	23.08 ± 5.51

1.5　数据处理

蒸发量计算采用压差法，即将水位数据记录仪各时刻压力数据与气象站对应大气压校核求和，并根据气象数据对水面高度进行矫正；其中，将气象站与水位数据记录仪时间序列对齐至整点，水位数据记录仪每日零点校准补偿。对相同处理 3 组重复数据，通过组间相关系数 R（≥0.85）和小时段均方根误差（RMSE）（≤2 mm）筛选基础一致性数据，保留至少 2 组有效数据并对缺失值进行相邻组均值插补，最终压力精确至 0.001 MPa 进行后续水位换算。

单位裸露面积水面蒸发量计算式为

$$E'' = \frac{E}{(1-p)S}$$

式中　E''——单位裸露面积水面蒸发量，mm/m^2

p——水面覆盖率，%　　E——蒸发量，mm

S——水面覆盖面积，m^2

2　结果与分析

2.1　不同覆盖方式下水面抑蒸率

2.1.1　水面累积蒸发量与抑蒸率

由图 2（图中不同小写字母表示处理间差异显著（$p<0.05$），下同）可知，FB、HFC、FP 及 HFP 水面累积蒸发量随着覆盖率增大而减小，水面抑蒸率随之增大。相同覆盖率和铺设方式下，FB 和 HFC、FP 和 HFP 水面抑蒸率接近，相差 0.39～6.65 个百分点。3 种覆盖率下，HFC 水面抑蒸率分别为 32.57%、43.36% 和 63.23%，与 FB 相比分别减小 −1.66、2.01、4.47 个百分点；FP 水面抑蒸率分别为 38.15%、51.84% 和 81.96%，与 HFP 相比分别增大 0.4、0.98、6.65 个百分点。4 种覆盖产品中 FP 抑蒸效果最好。

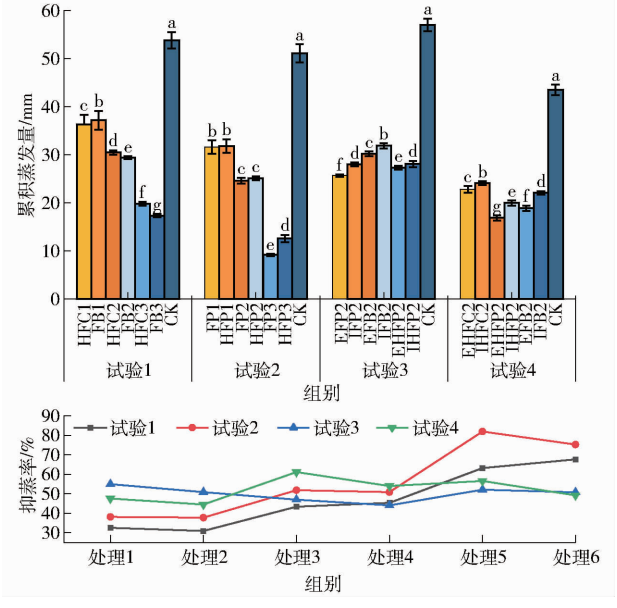


图 2　不同处理下水面累积蒸发量及抑蒸率

Fig. 2　Cumulative water evaporation amounts and suppression rates in various treatments

覆盖率约 70% 下，相同铺设方式下水面抑蒸效果由优到劣依次为 FP、HFP、FB、HFC。集中铺设方式下 FP 和 HFP 水面抑蒸率均大于 50%，FB 和 HFC 水面抑蒸率均约为 50%；相较于分散铺设，集中铺设水面抑蒸效果更好，FP、HFP、FB 和 HFC 水面抑蒸率分别提升 4.1、1.37、2.93 个百分点（试验 3），7.15、7.40、3.06 个百分点（试验 4），试验 4 中水面抑蒸效果更优。

2.1.2　水面蒸发量逐日变化

由图 3 可知，不同覆盖方式下逐日水面蒸发量整体呈现与 CK 相同的变化趋势，只是变化幅度略有差异，但不同覆盖方式均可有效抑制水面蒸发。对比试验 1、2，不同覆盖率下 FB、HFC、FP、HFP 逐日水面蒸发量变化趋势基本一致，并随着覆盖率增大而减少；相同覆盖率下 FP 和 HFP 逐日水面蒸发量接近，HFC 逐日水面蒸发量变化趋势与 FB 略有差异。对比试验 3、4，相同覆盖率下各处理逐日水面蒸发量接近，抑蒸效果由优到劣整体表现为 FP、HFP、FB、HFC，且集中铺设下逐日水面蒸发量小于分散铺设，与图 2 中水面累积蒸发量变化趋势基本一致。

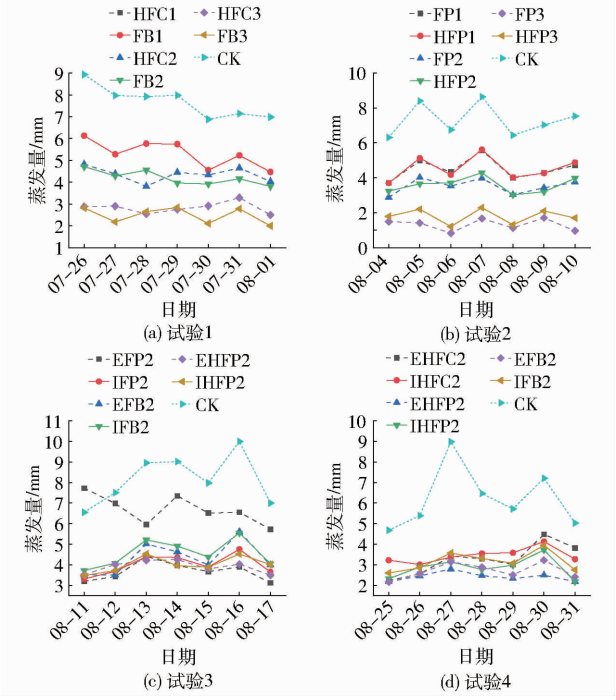


图 3　不同处理下逐日水面蒸发量变化曲线

Fig. 3　Daily water evaporation amounts in various treatments

2.1.3　单位裸露面积水面蒸发量

单位裸露面积水面蒸发量可用于判断水体蒸发程度和蒸发所需能量，不同处理下单位裸露面积水

面蒸发量与单位面积蒸发量呈现不同变化规律(图 4)。由试验 1、2 可见,单位裸露面积水面蒸发量与覆盖率呈负相关;从试验 3、4 可知,分散铺设下单位裸露面积水面蒸发量更大;各处理中,CK 单位裸露面积水面蒸发量最小。

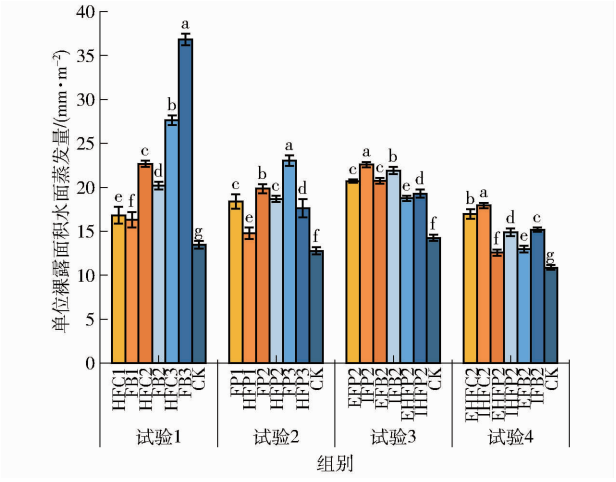


图 4 不同处理下单位裸露面积水面蒸发量

Fig. 4 Water evaporation amounts per unit exposed area in various treatments

2.1.4 水面覆盖率对蒸发量与抑蒸率的影响

为综合研究覆盖率对水面蒸发量及抑蒸率的影响,对不同试验覆盖率和蒸发量、覆盖率和抑蒸率分别进行相关性分析(表 4、5),并对覆盖率和蒸发量、覆盖率和抑蒸率的关系进行拟合。

表 4 覆盖率与蒸发量相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of coverage rates and total evaporation

试验序号	指标	覆盖率 Pearson 相关系数 R	覆盖率 Sig. 值(双尾)	覆盖率 个案数	蒸发量 Pearson 相关系数 R	蒸发量 Sig. 值(双尾)	蒸发量 个案数
1	覆盖率	1		7	-0.992**	0	7
	蒸发量	-0.992**	0	7	1		7
2	覆盖率	1		7	-0.803	0.030	7
	蒸发量	-0.803	0.030	7	1		7
3	覆盖率	1		7	-0.993**	0	7
	蒸发量	-0.993**	0	7	1		7
4	覆盖率	1		7	-0.959**	0.001	7
	蒸发量	-0.959**	0.001	7	1		7

注:** 表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著,下同。

表 5 覆盖率与抑蒸率相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of coverage rates and water evaporation suppression rates

指标	覆盖率 Pearson 相关系数 R	覆盖率 Sig. 值(双尾)	覆盖率 个案数	抑蒸率 Pearson 相关系数 R	抑蒸率 Sig. 值(双尾)	抑蒸率 个案数
覆盖率	1		24	0.913**	0	24
抑蒸率	0.913**	0	24	1		24

对比试验 1、2,不同覆盖产品下水面覆盖率与蒸发量相关系数绝对值均大于 0.8,在置信度为 5% 区间上存在相关性;对比试验 3、4,不同铺设方式下水面覆盖率与蒸发量的相关系数 R 分别为 -0.993 和 -0.959,呈显著负相关(表 4)。水面覆盖率与水面抑蒸率显著正相关,各处理相关系数 $R>0.9$(表 5)。多因素干扰下水面覆盖率仍是影响水面抑蒸效果的主要因素。不同试验期水面覆盖率和蒸发量的线性拟合效果良好,决定系数 $R^2>0.9$(图 5a);全试验期水面覆盖率与抑蒸率线性拟合 $R^2=0.832$(图 5b)。不同覆盖方式下水面覆盖率与蒸发量呈线性负相关关系,与水面抑蒸率呈正相关关系。

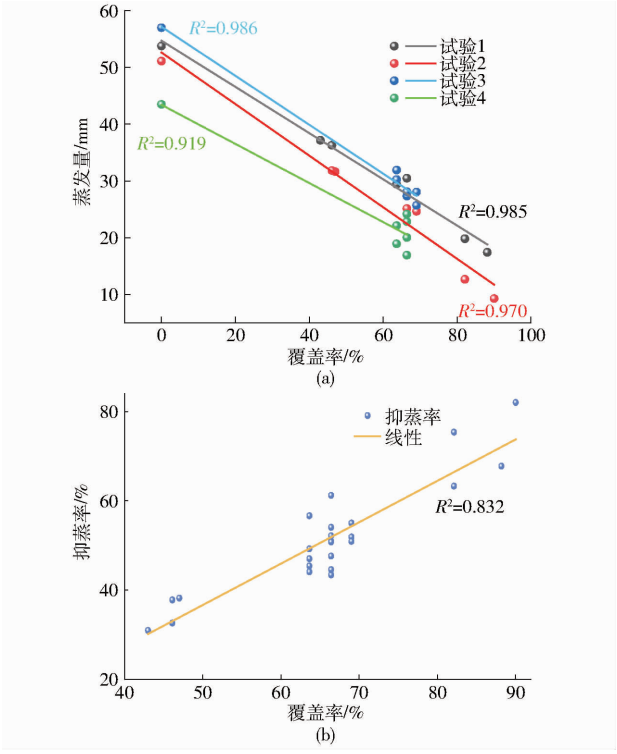


图 5 水面覆盖率与蒸发量、抑蒸率线性拟合关系

Fig. 5 Linear regressions of coverage rate, evaporation amount and suppression rate

2.2 不同覆盖方式下近水面空间体温度变化

2.2.1 水面温度日变化

水面温度呈显著日间变化,与大气温度密切关联:自 08:00—18:00,水面温度持续上升并于 18:00 达到峰值,随后逐渐下降(图 6,图中 AT、UC 分别表示大气温度、覆盖处理的裸露水面温度,下同)。覆盖处理(如 HFC)升温速率更快,且大气、覆盖水面和裸露水面温度变化趋势一致,表明覆盖产品主要通过调控辐射吸收改变表面水层热力学状态。试验 1、2 结果表明,覆盖处理的水面温度显著升高(如 FP 升高 1.0 ~ 2.75℃),日间变化趋势基本一致;试验 3、4 结果表明,由于覆盖间隙增大导致辐射吸收

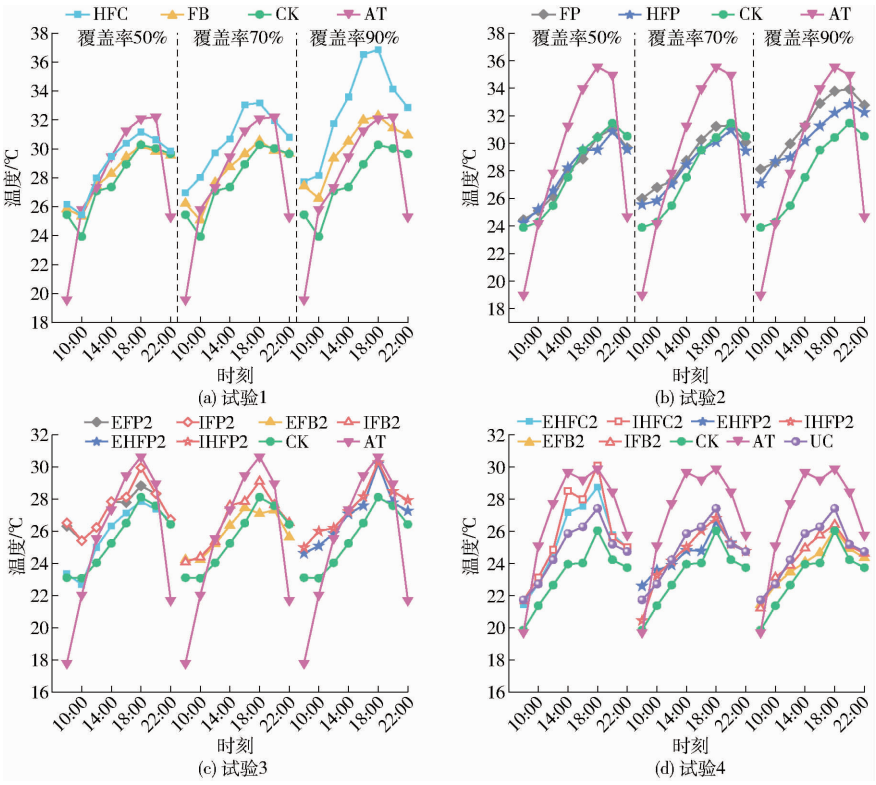


图 6　不同处理下水面温度日间变化曲线

Fig. 6　Diurnal water surface temperature changes in various treatments

面积增加，分散铺设的日间温度变化幅度较集中铺设增加 15% ~22%。CK 处理水面温度更低且蒸发量更大(图 3、6)，主要因为水-气温差增强了蒸发驱动力，无覆盖条件下表层气流扰动使水汽压差升高，从而加速水分子扩散。反之，高覆盖率通过减少辐射直射，降低水-气温差(如 FB3 降至 0.37℃)并抑制湍流交换，导致水汽扩散速率下降，显著抑制水面蒸发。

CK 处理水面温度和单位裸露面积蒸发量均最低，且二者呈显著正相关(图 7)。试验 1、2 结果表明，随着覆盖率从 50% 增至 90%，FB 水面温度分别升高 0.19、1.63℃，单位裸露面积蒸发量分别增加 3.90、16.50 mm/m^2；HFC 温度与蒸发量增幅分别为 0.8、1.17℃ 和 5.84、4.96 mm/m^2；FP 分别增加

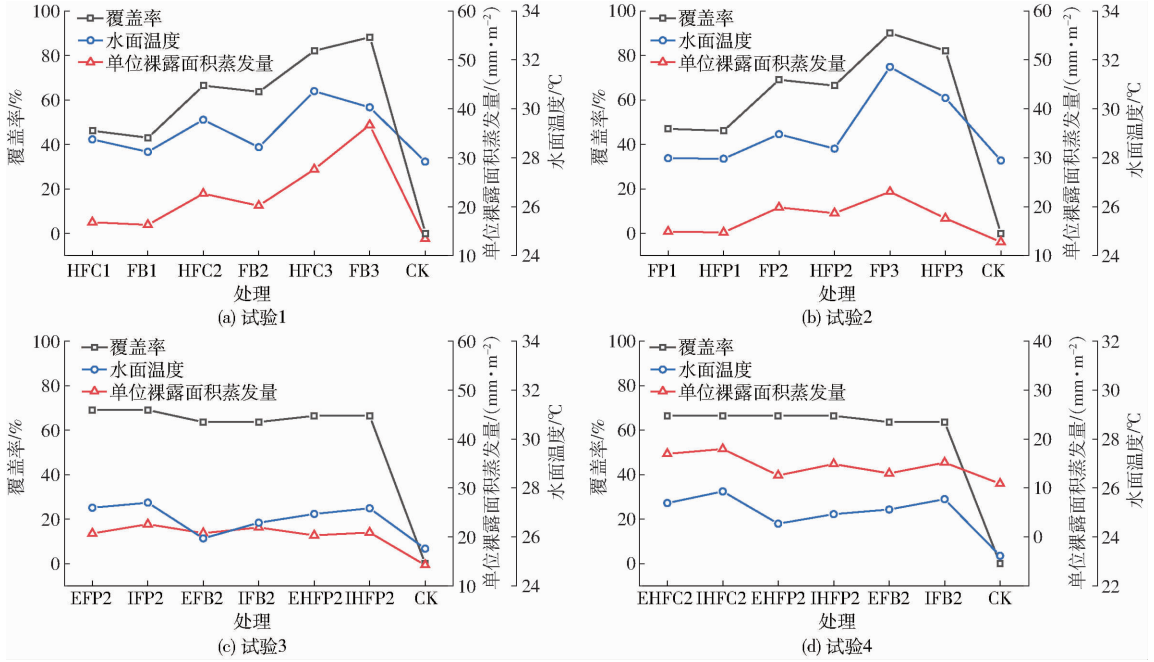


图 7　水面温度与单位裸露面积蒸发量关系

Fig. 7　Relationships of water surface temperature and water evaporation amount per unit exposed area

0.98、2.75℃和4.93、3.20 mm/m²；HFP分别增加0.41、2.07℃和3.93、-1.06 mm/m²。试验3、4结果表明，分散铺设水面温度更高、单位裸露面积蒸发量更大。试验3分散铺设方式下FP、FB、HFP水面温度、单位裸露面积蒸发量增幅分别为0.21℃和1.89 mm/m²、0.64℃和1.15 mm/m²、0.23℃和0.58 mm/m²，试验4分散铺设方式下HFC、HFP、FB水面温度、单位裸露面积蒸发量分别增加0.48℃和0.99 mm/m²、0.39℃和2.31 mm/m²、0.42℃和2.21 mm/m²。

2.2.2 近水面空间体温度

水面-近水面大气温差可作为水汽压差的表征指标，不同水层温差反映水体能量分布特征。不同处理下水面以上5 cm大气温度、水面温度及水面以下5 cm水层温度变化如图8所示。与上文气象数据不同，下文以“水-气温差”(0、5 cm)表示水面-近水面大气温差，不同水层温差即-5、0 cm水层温差。

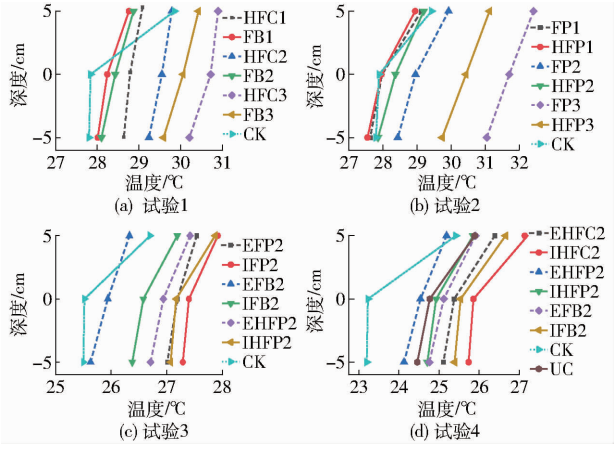


图8 不同处理下近水面空间体温度变化曲线

Fig. 8 Temperature profiles in near-water surface space in various treatments

由图8可知，CK近水面大气温度与气象站温度一致，而其水层温度显著低于覆盖处理，导致水-气温差最大。由于各水层均匀吸收太阳辐射且水的比热容较高，故而升温速率较慢，不同水层温差可以忽略。结合图8和图2，当CK较同组最小水-气温差分别增加1.83、0.85、0.83、0.47℃时，水面蒸发量分别增加171.99%、305.07%、122.04%和108.79%。试验1、2结果表明，水-气温差随着覆盖率增大呈下降趋势，不同水层温差逐渐增加。FB在覆盖率50%、70%、90%下水-气温差分别为0.52、0.44、0.37℃，不同水层温差分别为0.23、0.33、0.47℃；HFC温差分别为0.29、0.24、0.18℃和0.15、0.31、0.51℃；FP温差分别为1.25、0.97、0.71℃和0.35、0.52、0.66℃；HFP温差分别为0.99、0.83、0.69℃和0.41、0.51、0.7℃。水面覆盖率增大，水-气温差减小0.05~0.54℃，不同水层温差增大0.1~0.36℃。试验3、4结果表明，集中铺设下FP、FB、HFP水-气温差降低0.17~0.22℃，不同水层温差增加0.07~0.13℃；集中铺设时HFC、HFP、FB水-气温差降低0.24~0.33℃，不同水层温差增大0.15~0.21℃。与分散铺设相比，集中铺设可降低水-气温差0.17~0.33℃，增大不同水层温差0.07~0.21℃。

3 讨论

不同覆盖产品的抑蒸率均随覆盖率增大而显著上升，该结论与前人研究结论类似[22-23]。相较于FB，HFP和FP抑蒸效果更好，该结论与LI等[24]的浮球、浮板蒸发差异研究结论相似。然而，试验1、4的FB与E/IFB，试验3、4的E/IFB、E/IHFP水面蒸发量差异较大，可能受风速、大气温度和相对湿度等条件影响，试验4风速较平均值减小1.28 m/s，气温下降2.33℃，相对湿度增大3.76个百分点。HFC水面蒸发量偏大且与FB蒸发趋势不同(图3a)，可能由于表面凹槽积水，其蒸发滞后性导致部分日蒸发量偏高。水面覆盖率与蒸发量的强线性关系($R^2>0.9$)表明其主导作用，而覆盖率-抑蒸率的拟合度稍低($R^2=0.832$)，表明蒸发具有多因子耦合效应，即覆盖方式与环境因子对蒸发的共同作用，HAO等[25]将该现象归因于覆盖策略与微气候的协同调控。

水面覆盖通过限制辐射能输入降低水体温度[26]。HAO等[25]发现，增大覆盖率对于能量平衡组分的大小、方向和相对比例具有调控效应，提高水面温度的同时增强抑蒸效果。与之不同的是，考虑到覆盖产品对水温的影响主要与材料本身导热率及水体-近水面大气有关[14]，本文在此基础上系统分析了不同覆盖方式下水面抑蒸率及其与近水面空间体温度的关系，聚焦于-5~5 cm水-气层能量动态与水面蒸发的直接关联。研究揭示了覆盖产品在水-气温差削减、不同水层温差增强的近水面空间体温度调配中发挥强作用，故而抑蒸效果较好。CK与覆盖处理近水面空间体特征相反，主要是由于水面覆盖产品削弱太阳辐射，其截获辐射通量导致水体表面局部变暖[14]。BENJAORAN等[27]发现塑料瓶连接成排比任意铺设降低蒸发量0.5 mm/d。本文进一步发现集中铺设通过均质化水-气界面热环境降低水-气温差0.17~0.33℃，增大不同水层温差0.07~0.21℃，较分散铺设抑蒸率最大可提升7.41个百分点。主要是由于分散铺设的局部裸露区与覆

盖区的温湿度交互作用造成水-气压差反弹效应，削弱覆盖层的整体抑蒸效果，表明热量分布的均一性是优化水面抑蒸效果的潜在要素。研究还发现覆盖率是改变水面温度从而影响单位裸露面积蒸发量的关键因素，覆盖率增加 40 个百分点，FP3 较 FP1 水面温度最大提升 3.73℃，FB3 较 FB1 水面蒸发量增加 20.40 mm/m^2。这一差异与覆盖产品的物理特性密切相关：FP 因单体覆盖面积大且密封性高，增大有效接触面积且保温效果更好；FB 为非全覆盖结构，增大覆盖率对削减表面水层与上层大气水分子交换效果更明显。

水面覆盖率、水面温度和单位裸露面积蒸发量三者呈正相关关系。增大覆盖率通过减少水体能量输入，吸收并再辐射热量导致覆盖区附近裸露水面局部升温；在相同总辐射能量输入下，裸露面积缩小使得单位面积接收净辐射通量增加，驱动蒸发强度增加；升高的裸露水面温度则在边缘效应下增大覆盖面与无覆盖面表面水层、覆盖面表面水层与大气温差，增大蒸发驱动力，提高水面蒸发速率。综上，不难看出覆盖产品抑蒸效果的物理机制，即水-气温差与水面蒸发量、不同水层温差和水体热量传递变化：水-气温差减小可显著抑制蒸发，不同水层温差增大则表明更多辐射能进入水体深层。水体吸收辐射获得热量升温，但水体温度始终小于大气温度，在水体持续吸热过程中水分子蒸发，从水体获取热量，水体温度下降，可解释 CK 处理水面温度低、水-气温差大。对于覆盖处理，随着覆盖率增大，覆盖产品对水体吸收辐射的削弱效果增强，产品吸收并反射大部分辐射转化为热量聚集在产品表面，吸收辐射转换的热量不同于光照辐射直达浅水底部，而缓慢向下层水体及大气传递，故而接触面升温更快，增大不同水层温差。高覆盖率下覆盖产品吸收辐射并转换为更多热量，导致水面与近水面大气温度上升，该过程中由于水温较大气温度更低，水体获取更多热量，减小水-气温差，同时导致表水层水汽压差减弱，蒸发驱动力下降故而蒸发较小。

从经济角度考虑，单位面积费用 HFC、FP、HFP 较经济，FB 价格最高（约 170 元/m^2）。结合抑蒸率，HFC 具有蒸发滞后性，FP、HFP 抑蒸效果更佳。从应用角度，使用 EPS 材料的 FP、HFP 耐久性较差，HDPE 材质的 FB、HFC 使用寿命较长，需拼接使用的完全覆盖式产品 HFC、FP、HFP 整体性受环境影响大，FB 便于生产和使用实际、风浪下耐用性强且不易叠加[28-29]，仍是可靠的物理覆盖。总地来看，覆盖产品选择仍需结合实际使用场景。本文选择典型的强蒸发时期开展试验，但鉴于短周期可能缩小了各影响因素对表水层蒸发的影响程度，相关研究还需进行长期观测。同时，水体水-气压差受近水面湿度条件影响，仍需量化湿度并结合温度，从近水面空间体角度进一步分析近水面水-气变化特征，更全面分析水面抑蒸的影响因素。覆盖产品效果评价不应单局限于抑蒸效果，未来研究应同时关注高覆盖率对水质的影响，融合新型覆盖产品在抑蒸率、耐久性和生态方面的优势，并充分发挥其综合效益。

4　结论

（1）水面覆盖抑蒸核心机制源于其对水面-近水面大气界面能量交换的阻断，尽管覆盖产品与铺设方式会产生边际效应，但覆盖率仍是影响水面抑蒸效果的核心因素。

（2）水面覆盖抑蒸效果受多因子耦合影响，与覆盖率呈正相关关系，集中铺设可提高抑蒸率 1.37 ~ 7.40 个百分点，不同覆盖产品抑蒸率相差 0.39 ~ 6.65 个百分点。

（3）覆盖产品对水体接收辐射的影响主要表现在水面-近水面大气、不同水层温度变化，增大覆盖率、集中铺设均可减小水-气温差、增大不同水层温差从而增强抑蒸效果。不同覆盖率（约 50%、70%、90%）下，空心浮球、矩形浮板、正六边形浮板、正六边形浮盖处理，随覆盖率增大水-气温差减小 0.05 ~ 0.54℃，不同水层温差增大 0.1 ~ 0.36℃，抑蒸率提高 10.69 ~ 43.82 个百分点；覆盖率 70% 下集中铺设水-气温差减小 0.17 ~ 0.33℃，不同水层温差增大 0.07 ~ 0.21℃，抑蒸率提高 1.37 ~ 7.40 个百分点。

参　考　文　献

[1]　王熹，王湛，杨文涛，等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程，2014，32(7)：1-5.
WANG Xi，WANG Zhan，YANG Wentao，et al. Shortage of water resources in China and countermeasures[J]. Environmental Engineering，2014，32(7)：1-5.（in Chinese）

[2]　王步之，侍克斌，徐思远，等. EPS 浮球覆盖下静水水面蒸发抑制率与最优直径研究[J]. 节水灌溉，2023(5)：33-38，45.
WANG Buzhi，SHI Kebin，XU Siyuan，et al. Study on the evaporation suppression efficiency and optimal diameter of static surface covered by EPS floating ball[J]. Water Saving Irrigation，2023(5)：33-38，45.（in Chinese）

[3]　张玉祥，穆振侠，田晓杰. 新疆水资源空间均衡评价[J]. 水电能源科学，2023，41(8)：56-60.

ZHANG Yuxiang, MU Zhenxia, TIAN Xiaojie. Spatially balanced evaluation of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(8): 56 – 60. (in Chinese)

[4] 李云霞,王国栋,刘瑜,等. 新疆典型绿洲灌区土壤理化性质与盐分离子分布特征[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 357 – 364, 414.
LI Yunxia, WANG Guodong, LIU Yu, et al. Distribution characteristics of soil physicochemical properties and salt ions in typical oasis irrigation areas of Xinjiang.[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7):357 – 364, 414. (in Chinese)

[5] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 149 – 159.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 149 – 159. (in Chinese)

[6] 邓铭江,陶汪海,王全九,等. 西北现代生态灌区建设理论与技术保障体系构建[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 1 – 13.
DENG Mingjiang, TAO Wanghai, WANG Quanjiu, et al. Theory and technical guarantee system construction of modern ecological irrigation district in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 1 – 13. (in Chinese)

[7] 韩鑫,严新军,李振勇. 抑制干旱区平原水库无效蒸发技术分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 5 – 8.
HAN Xin, YAN Xinjun, LI Zhenyong. Analysis of inhibiting ineffective evaporation of plain reservoirs in arid areas[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 5 – 8. (in Chinese)

[8] 邓鑫,叶含春,李志刚,等. 单分子膜不同铺膜量阻水面蒸发小区试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 86 – 89.
DENG Xin, YE Hanchun, LI Zhigang, et al. Filming different amounts monolayer blocking cell surface evaporation experimental research[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6): 86 – 89. (in Chinese)

[9] SCOFIELD J, SHI S, PRIME L, et al. Evaporation reduction and salinity control in microalgae production ponds using chemical monolayers[J]. Algal Research, 2022, 66: 102783.

[10] 刁文博,许士国,于越男. 减阻水面蒸发探讨[C]//2019(第七届)中国水生态大会论文集, 2019.

[11] 唐凯,何新林,姜海波. 干旱区平原水库水面蒸发消减研究综述[J]. 人民长江, 2017, 48(5): 33 – 37.
TANG Kai, HE Xinlin, JIANG Haibo. Review on research of water surface evaporation reduction of plain reservoirs in arid area[J]. Yangtze River, 2017, 48(5): 33 – 37. (in Chinese)

[12] SEGAL L, BURSTEIN L. Retardation of water evaporation by a protective float[J]. Water Resources Management, 2010, 24(1): 129 – 137.

[13] HASSAN M M, PEIRSON L W, NEYLAND B M, et al. Evaporation mitigation using floating modular devices[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 742 – 750.

[14] LEHMANN P, AMINZADEH M, OR D. Evaporation suppression from water bodies using floating covers: laboratory studies of cover type, wind, and radiation effects[J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4839 – 4853.

[15] REZAZADEH A, AKBARZADEH P, AMINZADEH M. The effect of floating balls density on evaporation suppression of water reservoirs in the presence of surface flows[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125323.

[16] 严新军. 内陆干旱区平原水库防蒸发节水试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2004.
YAN Xinjun. Study on water saving by preventing evaporation experiment in inland arid area plain reservoirs[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2004. (in Chinese)

[17] 武金慧. 旱区水库抑制水面蒸发试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
WU Jinhui. Experimental study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid region[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)

[18] 张永山,侍克斌,严新军. 防蒸发材料局部覆盖干旱区平原水库节水试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 132 – 135.
ZHANG Yongshan, SHI Kebin, YAN Xinjun. Experiment on water saving of plain reservoir of covering part of anti-evaporation materials in arid area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 132 – 135. (in Chinese)

[19] 姜海波,唐凯,何新林. 抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 119 – 124.
JIANG Haibo, TANG Kai, HE Xinlin. Experimental study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 119 – 124. (in Chinese)

[20] 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[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 376 – 385.
HAN Kewu, SHI Kebin, YAN Xinjun, et al. Analysis on water saving efficiency of PE spheres covering plain reservoirs in arid area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 376 – 385. (in Chinese)

[21] 韩克武. 浮球覆盖下干旱区平原水库防蒸发节水研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
HAN Kewu. Study on water saving efficiency of plain reservoirs covered with spheres in arid area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[22] 石祥. 浮箱围栏中浮球覆盖水面的防蒸发节水率与效益分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.

SHI Xiang. Research on the anti-evaporation water-saving rate and benefit analysis of floating ball covering water surface in floating box enclosure[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[23] 李勋,严新军,侍克斌. 覆盖面积和网围结构对水面蒸发抑制率的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 117 - 123.
LI Xun, YAN Xinjun, SHI Kebin. Influence of coverage area and enclosure structure on suppression rate of water-surface evaporation[J]. Yangtze River, 2019, 50(3): 117 - 123. (in Chinese)

[24] LI C L, SHI K B, YAN X J, et al. Experimental analysis of water evaporation inhibition of plain reservoirs in inland arid area with light floating balls and floating plates in Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26(2): 04020060.

[25] 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[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287: 108460.

[26] AMINZADEH M, LEHMANN P, OR D. Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(7): 4015 - 4032.

[27] BENJAORAN V, RAKSAKSRI L, SETTAKHUMPOO J. Experimentation of evaporation reduction by a use of plastic bottles covering[J]. Water Conservation & Management, 2023, 7(2): 114 - 121.

[28] LI C, LI C, GU J, et al. Anti-evaporation effect and water-saving benefit analysis of water surface evaporation by different physical materials and coverage rate[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2022, 128: 103281.

[29] HAN K W, SSHI K B, YAN X J. Evaporation loss and energy balance of agricultural reservoirs covered with counterweighted spheres in arid region[J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 106227.

(上接第 707 页)

[29] 赵玉清,杨慧丽,张悦,等. 基于特征组合与 SVM 的小粒种咖啡缺陷生豆检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 295 - 302.
ZHAO Yuqing, YANG Huili, ZHANG Yue, et al. Detection of defective Arabica green coffee beans based on feature combination and SVM[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14): 295 - 302. (in Chinese)

[30] 严萌,于雅雯,王玲静,等. 基于多特征联合稀疏表达的 SOM - K-means 非侵入负荷辨识[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 61 - 71.
YAN Meng, YU Yawen, WANG Lingjing, et al. SOM - K-means non-intrusive load identification based on multi feature joint sparse expression[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 61 - 71. (in Chinese)

[31] 安晓飞,王培,罗长海,等. 基于 K-means 聚类和分区寻优的秸秆覆盖率计算方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 84 - 89.
AN Xiaofei, WANG Pei, LUO Changhai, et al. Corn straw coverage calculation algorithm based on K-means clustering and zoning optimization method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 84 - 89. (in Chinese)

[32] 刘东,杨丹,张亮亮,等. 基于 BOA - SVM 模型的区域洪水灾害风险评估与驱动机制[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 304 - 315.
LIU Dong, YANG Dan, ZHANG Liangliang, et al. Regional flood disaster risk assessment and driving mechanism based on BOA - SVM model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 304 - 315. (in Chinese)

[33] 马亚丽,牛最荣,王兴繁,等. 缺资料地区产流径流时空特性分析及其关系研究——以洮河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 58 - 65.
MA Yali, NIU Zuirong, WANG Xingfan, et al. Spatio-temporal characteristics of water yield and runoff and their relationship in regions with scarce data: a case study of Taohe River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1):58 - 65. (in Chinese)

[34] 林康聆,周研来,陈华,等. 基于自组织映射神经网络的水库洪水过程分类[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 934 - 943.
LIN Kangling, ZHOU Yanlai, CHEN Hua, et al. Classification of reservoir flood processes based on self-organizing map neural networks[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 934 - 943. (in Chinese)

[35] 郑彦辰,李建柱,荣佑同,等. 降雨时空分布量化及其在洪水过程分类中的应用[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 560 - 573.
ZHENG Yanchen, LI Jianzhu, RONG Youtong, et al. Quantification of rainfall spatial and temporal distribution characteristics on the flood hydrograph and its application in flood type classification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 560 - 573. (in Chinese)

[36] 周炜兴,孙昭华,周坤,等. 三峡水库蓄水前后长江中下游流量频率分布特征及其对洪水造床作用的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 616 - 629.
ZHOU Weixing, SUN Zhaohua, ZHOU Kun, et al. Characteristics of discharge frequency and their effects on flood channel formation in the middle and lower reaches of the Yangtze River before/after the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 34(2): 616 - 629. (in Chinese)