

温棚太阳池模拟实验研究

肖树阳^{1,2}, 孟庆芬¹, 董亚萍¹, 李冰¹, 李武¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对温棚太阳池进行小型实验模拟, 通过开展活动式温棚太阳池、固定式温棚太阳池和普通太阳池 3 个平行模拟实验, 得到温棚结合太阳池的升温蓄热结果。实验结果表明, 活动式温棚太阳池的升温能力较好, 固定式温棚的恒温能力较好。温棚结合太阳池, 能够减小环境对太阳池的扰动, 延长太阳池在冬季的运行时间, 提高太阳池的升温能力和蓄热稳定性, 使太阳池更适合于盐湖生产工艺的实际需要。

关键词: 温棚; 太阳池; 模拟实验; 升温; 蓄热

中图分类号: TS352

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2013)01-0057-05

引言

西藏自治区盐湖位置偏僻, 交通不便, 能源价格较高并且供给不足。考虑到该地区日照强烈, 太阳能资源非常丰富, 如能充分利用好太阳能, 将大幅降低盐湖开发的成本。建造在西藏扎布耶盐湖的太阳池^[1], 成功地为盐湖锂资源的开发提供了热源。

西藏的环境气温较低, 以阿里地区的查波措盐湖为例^[2], 湖区最高气温 25℃, 最低气温为 -30℃, 年平均气温 -1℃, 全年冰冻期长达 110 d。较低的环境温度使太阳池的 UCZ (上对流层) 温度变低, 而 UCZ 和 LCZ (下对流层) 的温差对太阳池的蓄热性能有很大的影响^[3], 由此使太阳池的最高温度相对其它地区偏低, 昼夜温度波动幅度也较大^[4]。虽然采取增加 NCZ (非对流层) 厚度的措施可以减少太阳池由于 UCZ 和 LCZ 的温差造成的热损, 但野外环境中太阳池还容易受到大风、浮尘等天气的扰动。在冬季较长的冰冻期运行时, 冰层也将大大降低太阳池的辐射透过率, 这些不利的

环境因素都限制了太阳池在盐湖生产中的应用, 因此仅仅通过增加 NCZ 的厚度, 并不能有效地改善太阳池的蓄热性能。同时盐湖老卤的浊度往往较大, 如果太阳池的 NCZ 过厚, 将会影响太阳池的升温时间和效果。采用温棚结合太阳池, 能够提高太阳池的表层水温, 使其在 NCZ 厚度有限的情况下改善升温蓄热性能。同时温棚也能够延长太阳池的无冰期, 降低大风、浮尘等恶劣天气的影响, 使太阳池更适合于盐湖生产工艺的实际需要。

国内外相关研究中将温棚和太阳池结合运用的例子并不多见。曹金龙等^[5]在进行海水养殖越冬研究时, 建立了温室型太阳池多功能作业系统, 取得了很好的经济效益, 但对于太阳池结合温棚的升温蓄热规律并没有详细阐述。本文通过进行温棚太阳池模拟实验, 初步探索温棚和太阳池结合的升温蓄热方式, 就利用温棚太阳池进行卤水升温蓄热的可行性进行探讨。

1 实验

实验采用 3 个长宽高尺寸为 70 cm ×

收稿日期: 2012-09-27; 修回日期: 2012-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(41073023)

作者简介: 肖树阳(1987-) 男, 硕士, 研究方向为盐湖开发中自然能的利用。

50 cm × 60 cm 的水箱作为实验容器,箱壁和箱底均用保温棉包裹处理进行保温。1 号池和 2 号池模拟温棚太阳池,考查温棚结合太阳池的升温蓄热效果。其中 1 号池模拟活动式温棚太阳池,仅在夜间用塑料布覆盖,白天接受太阳辐射时打开。2 号池模拟固定式温棚太阳池,从实验开始自始至终一直用塑料膜覆盖。3 号池不做处理,模拟普通太阳池用作对比。

实验用 NaCl 和 CaCl_2 配制成的饱和溶液。灌注采用 Zangrando 方法^[6],即先灌注饱和卤水,然后将水平扩散器放在 LCZ 和 NCZ 的交界处,由扩散器注入清水,根据水面升高速度调整水平扩散器的提升速度,使扩散器的提升速度恰好为水面升高速度的两倍;当水平扩散器提升至水面后,即完成了 NCZ 的灌注,最后再通过漂浮板加注一层清水作为 UCZ,从而完成密度梯度的构建。

实验期间测定了模拟太阳池不同高度的水温、密度值,以及太阳总辐照量、环境温湿度和风速等气象参数。为测量不同高度的水温和密度值,在池中心位置沿竖直方向距桶底的距离分别为 0、10、20、27、34、40、45、50 cm 处布置水温传感器和水平取样装置。太阳辐照强度采用 TBQ-2 型太阳总辐照表测定,环境温湿度采用 PTS-3 型环境温湿度仪测定,风速采用 9X-9S 型数字风速计测定,水温采用 PTWD-2A 水温传感器测定,水样密度采用日本 KEM 公司 DA-130N 型便携式密度计测定。气象数据和水温均由 TRM-ZS2 型水温气象记录仪自动采集和存储。

2 结果与讨论

2.1 实验期间的天气情况

实验前 5 d 的天气情况较好,从第 6 d 开始气温大幅下降,降雨增多(从相对湿度可以看出),太阳池的 LCZ 温度在第 4 d 达到最高值。以后的实验过程中,由于太阳辐照量显著减小,气温降低,因而均未达到第 4 d 的最高温度。具体天气情况见图 1。阴雨天气导致 3 个模拟太阳池的水温发生了不同程度的变化,对水温

的变化情况下文作具体分析。

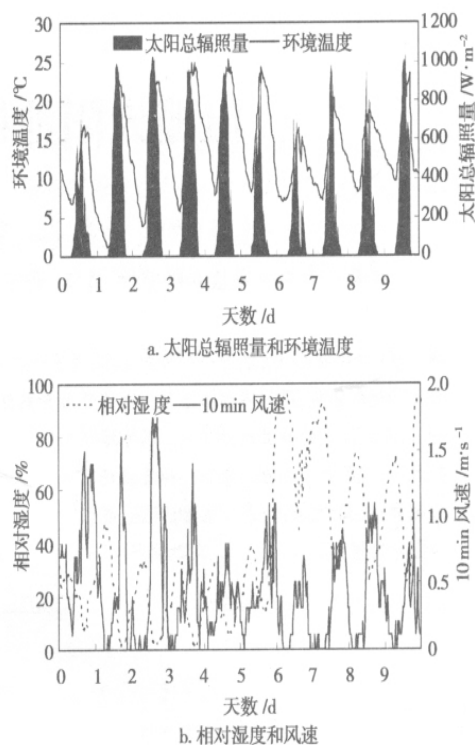


图 1 实验期间的气象数据

Fig. 1 Weather conditions during experiment

2.2 3 个池的密度分布

3 个模拟太阳池的密度分布见图 2。从图中可以看出 3 个模拟太阳池的 LCZ、NCZ 和 UCZ 厚度均分别为 10、30、10 cm。3 个模拟太阳池所用的溶液和灌注方法都一样,所以 3 个模拟太阳池各层的厚度和密度变化趋势基本一致。因此可以排除溶液种类、NCZ 厚度和密度梯度变化率等因素对模拟太阳池蓄热性能的影响,从而以单一因素考查温棚对太阳池的影响。

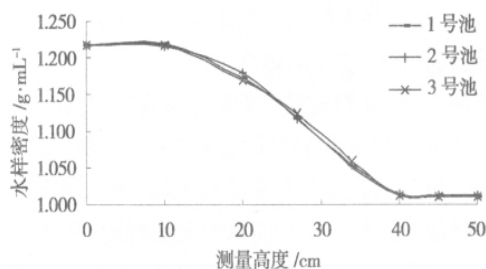


图 2 模拟太阳池的密度分布

Fig. 2 Density profiles of simulated solar ponds

温棚的保温作用将使太阳池上部水温升高

(图3),这将引起上部溶液密度发生变化,从而改变太阳池密度梯度的稳定性。太阳池的稳定性条件可由公式(1)表示^[7-8]。

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\partial\rho}{\partial S} \cdot \frac{dS}{dx} + \frac{\partial\rho}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx} \geq 0, \quad (1)$$

式中 ρ 为溶液密度 kg/m^3 ; x 为深度 m ; S 为盐浓度 kg/m^3 ; T 为温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

温棚使太阳池的表层水温升高,温度梯度变化 ΔT 减小。受表层水温升高影响,上部溶液密度减小,密度梯度变化 $\Delta\rho$ 变大,而盐浓度 DS 和深度 Dx 不变,所以 $\frac{d\rho}{dx}$ 的值增大,太阳池的密度梯度稳定性增强。即温棚太阳池表层水温较普通太阳池高,表层溶液密度值较普通太阳池更小,温棚太阳池的密度梯度分布更加稳定。

2.3 3个池的纵向水温分布

由于实验过程后期降雨增多,不能很好地说明3个池内的温度分布,故选取第4d(4-28 17:30 表层水温较高时)和第4.5d(4-29 05:30 表层水温较低时)的温度分布情况作为说明,两个时间点下模拟太阳池的纵向温度分布情况分别见图3a和图3b。

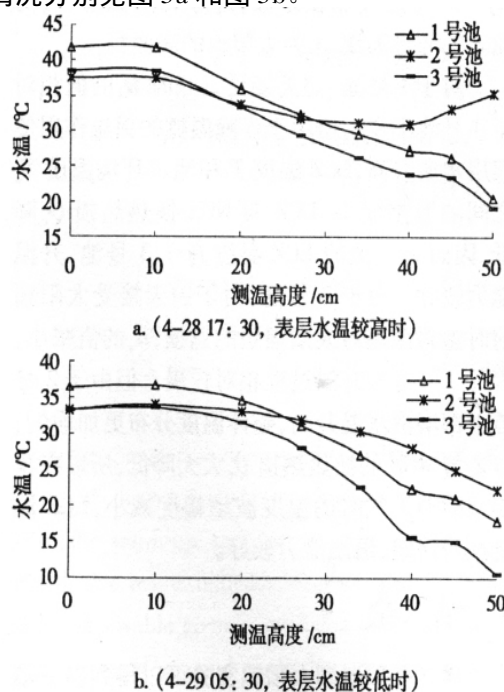


图3 模拟太阳池温度分布

Fig.3 Temperature profiles of simulated solar ponds

从图3a可看出在白天接受太阳辐射表层水温较高时,1号池和3号池温度梯度分布情况基本一致。2号池由于白天一直覆盖塑料膜,底层温度较直接接受日照辐射的1号池和3号池稍低,但其表层水温较高,并未形成和1号池、3号池一样的温度梯度,而是出现了中间低两头高的温度分布。

从图3b可看出晚上没有太阳辐射时,1号池由于覆盖塑料膜,减少了夜间热损,表层水温较3号池下降幅度要小。2号池的表层水温也有所降低,形成了坡度较为平缓的温度梯度,但NCZ中部以上的水温较1号池和3号池仍较高。

从3个池的纵向水温分布来看,1号池虽然存在和3号池一样的温度梯度分布,但其夜晚表层水温降低幅度要小,因而1号池的底层水温较高(图5)。2号池虽然存在和3号池一样的密度梯度,但由于一直覆盖塑料膜,表层水温始终较高,所以不存在3号池典型的温度梯度分布。与3号池相比,2号池整体温度分布更加均匀,因此受环境扰动时温度波动幅度较小(图5)。

2.4 3个池的表层水温变化

图4所示的是模拟太阳池表层水温的变化情况。从图上可以看出,2号池由于始终覆盖塑料膜,表层水温最高,但因为温棚内的气温主要受太阳辐照强度的影响,所以在夜晚没有辐照时降温幅度最大,而其水温仍高于1号和3号池。1号池由于仅在夜晚覆盖塑料膜,所以白天最高水温和3号池较为接近,但夜间的降温幅度与3号池相比要小得多,整体水温介于

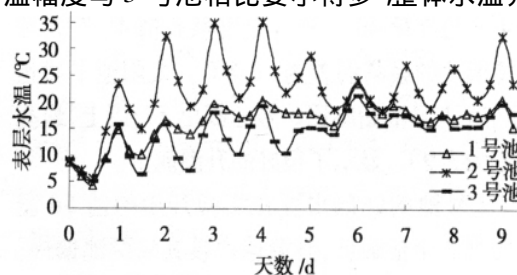


图4 模拟太阳池表层水温变化曲线

Fig.4 Surface water temperature varied graphs of simulated solar ponds

2 号池和 3 号池之间。3 号池由于未覆盖塑料膜,所以表层水温最低。但实验后期由于降雨天气增多,3 号池也开始覆盖塑料膜,因此温度走势逐渐接近 1 号池。

表层水温升高是温棚提高太阳池性能的重要原因。太阳池 UCZ 的热量损失 Q_t 可由公式 (2) 表示^[9]。

$$Q_t = Q_c + Q_e + Q_r, \quad (2)$$

式中 Q_c 为池表与空气的对流热损; Q_e 为池表面的蒸发热损; Q_r 为池表与空气的辐射热损。

由于太阳光谱主要是可见光和近红外线,所以大部分可以穿透塑料膜。光线被表层清水吸收转化为热能后,池表清水会以远红外线的形式辐射能量,但由于其波长太长,无法透过塑料膜,所以大多都会积累在温棚内或被温棚内的水蒸气所吸收,故太阳池的表层水温和温棚内的气温会慢慢升高,池表与空气的辐射传热 Q_r 也会大大降低。塑料膜将太阳池表层清水与空气的直接对流隔开,池表与空气的对流热损 Q_c 只能通过塑料膜与外界空气的对流换热实现,由于塑料膜的阻隔,对流热损 Q_c 将变小。塑料膜的阻隔同时也降低了棚内风速,增大了空气湿度,因此池表的蒸发量变小,故蒸发热损 Q_e 也相应变小。综合温棚的保温作用和几种表层清水的热损途径,温棚能够提高太阳池的表层水温,减少 UCZ 的热量损失。

2.5 3 个池的底层水温变化

图 5 所示的是模拟太阳池底层水温的变化情况。由于模拟太阳池 NCZ 的厚度较薄,故 LCZ 的温度受环境条件的变化影响较大。从图上可以看出 1 号池的升温效果最好。实验过程中 1 号池在第 4d 达到了温度最高值 41.7℃ 和环境温度的最高温差为 28.8℃。太阳池平稳运行之后,1 号池始终比 3 号池高出 3℃ 以上,最高温差为 3.9℃,显示了很好的升温能力。

2 号池的底部水温在实验开始的前 5d 温度均为 3 个池最低,升温速率较其它两池偏慢。但在 1 号池和 3 号池受环境变化的影响水温下降较多时,2 号池降温速率和其他两池相比较慢,温度波动最小。在实验后期的降温天气开始后,2 号池水温开始高于 3 号池,最高比 3 号

池高出 2.9℃,温度波动幅度最小,显示了很好的恒温能力。

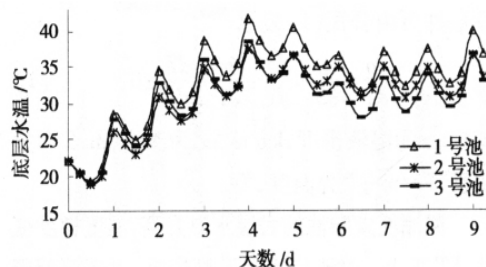


图 5 模拟太阳池底层水温变化曲线

Fig. 5 Bottom water temperature varied graphs of simulated solar ponds

温棚太阳池底层水温的变化与塑料膜对太阳光的遮损以及上部水温升高有关,对于太阳池 LCZ 的热量平衡可由公式 (3) 表示。

$$Q_{lcz} = H_e - Q_c - Q_g - Q_s, \quad (3)$$

式中 Q_{lcz} 为下对流层热量损失; H_e 为下对流层吸收的有效辐射能; Q_g 为下对流层与土壤换热的热损; Q_s 为下对流层与侧壁换热的热损; Q_c 为 LCZ 与 NCZ 换热的热损,且有下式^[10]。

$$Q_c = k(T_l - T_a)A, \quad (4)$$

式中 k 为池表热损系数; T_l 为 LCZ 温度; T_a 为池表的环境温度; A 为太阳池的表面积。

对于 1 号池,白天接受日照时 H_e 的值相对于 3 号池不变。但由于夜晚温棚的保温作用使表层水温升高,LCZ 温度 T_l 和池表环境温度 T_a 之间的温差变小,LCZ 与 NCZ 换热热损 Q_c 降低,因而 1 号池的 LCZ 温度高于 3 号池,升温能力较好。对于 2 号池,由于白天接受太阳辐射时塑料薄膜对太阳辐照的遮损 H_e 的值减小,因此 2 号池的升温过程相对较慢。但由于 2 号池上部溶液水温升高,整体温度分布更加均匀,LCZ 与 NCZ 的换热热损 Q_c 大大降低,所以在夜晚或降温天气时的温度波动幅度减小,LCZ 温度相对稳定,恒温能力较好。

3 结 论

通过模拟温棚太阳池实验可以得到以下结论。

1) 在温棚太阳池中,上部水温升高并不会影响太阳池的稳定性。由于减小了太阳池 LCZ

和UCZ的温差,因而能够提高太阳池的整体蓄热稳定性。但对于温棚太阳池的升温蓄热性能和盐度梯度的变化,还需要进行深入的研究和长期的监测。

2) 1号池(活动式温棚太阳池)的升温能力较好,在本次模拟太阳池平稳运行之后,1号池始终比3号池(普通太阳池)高出3℃以上,最高温差为3.9℃。盐湖生产工艺中,在NCZ厚度有限的情况下,采用移动式温棚太阳池可以降低夜晚热损,缩短升温时间,提高蓄热性能。

3) 2号池(固定式温棚太阳池)的恒温能力较好,在环境扰动下,温度波动幅度最小。盐湖生产工艺中,采用固定式温棚太阳池能够在NCZ厚度有限的情况下,减小由昼夜温差造成的温度波动,提高太阳池的蓄热稳定性。

4) 小型模拟温棚太阳池实验的条件比较理想,NCZ厚度较薄,LCZ卤水蓄热量较小,使其水温受环境条件的影响与大型太阳池相比还有一定的区别,如果要在实际生产中应用,还要在野外环境中实地考察升温蓄热效果。

参考文献:

[1] 黄维农,王学魁,孙之南,等. 西藏扎布耶盐湖太阳池的

建造与运行实验[J]. 太阳能学报, 2010, 31(2): 163 - 167.

[2] 徐文芳,沙作良,王彦飞,等. 查波措盐湖卤水冻硝过程的研究[J]. 盐业与化工, 2011, 40(6): 8 - 10.

[3] Saleh A, Qudeiri J A, Al-Nimr M A. Performance investigation of a salt gradient solar pond coupled with desalination facility near the Dead Sea [J]. Energy, 2011(36): 922 - 931.

[4] Nie Z, Bu L Z, Zheng M P, et al. Experimental study of natural brine solar ponds in Tibet [J]. Solar Energy, 2011(85): 1537 - 1542.

[5] 曹金龙,马温厚. 海岸太阳池工程技术研究与开发[C]//北京:中国太阳能学会2001年学术会议论文摘要集, 2001.

[6] Zangrando F. A simple method to establish salt gradient solar ponds [J]. Solar Energy, 1980(25): 467 - 470.

[7] 李申生. 太阳能热利用导论[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.

[8] Weinberger H. The Physics of the Solar Pond [J]. Solar Energy, 1964, 8(2): 45 - 56.

[9] Kurt H, Halici F, Binark A K. Solar pond conception experimental and theoretical studies [J]. Energy Conversion & Management, 2000(41): 939 - 951.

[10] Alkhalaileh M T, Atieh K A, Nasser N G, et al. Modeling and simulation of solar pond floor heating system [J]. Renewable Energy, 1999(18): 1 - 14.

Experimental Study of Simulated Solar Ponds Integrated with Greenhouse

XIAO Shu-yang^{1,2}, MENG Qing-fen¹, DONG Ya-ping¹, LI Bing¹, LI Wu¹

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Small-size experiments of simulated solar ponds integrated with greenhouse were carried out. By means of three parallel experiments: removable greenhouse, immovable greenhouse and normal solar pond, the warm-up and thermal storage performance of solar pond integrated with greenhouse was obtained. The result indicates that removable greenhouse shows the great performance of rapid warm-up while immovable greenhouse has a fine capability of reducing the temperature fluctuation. With the help of greenhouse, solar pond can reduce the environmental disturbance, prolong the operating time in winter and improve the warm-up performance and thermal storage stability. Those improved factors will make the solar pond more suitable for the saline exploitation technic.

Key words: Greenhouse; SGSP; Simulated experiment; Warm-up; Thermal storage