

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.004

基于系统分析的污泥太阳能干化效率提升研究

吴文庆, 梅晓洁, 方宁, 郭亚丽
(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 结合具体工程实践,基于热质守恒定律对江淮地区某太阳能干化厂温室大棚的理想蒸发量进行了理论分析,考虑了玻璃透过率、通风量等因素对干化能力的影响,提出了太阳能干化系统效率提升的有效改进措施。结果表明,该厂温室大棚的全年平均理想蒸发量为设计值的52%,平均相对热效率为65%,平均绝对热效率为36%。系统分析显示,太阳能干化技术具有明显的季节性特征,冬季理想蒸发量仅相当于全年理想蒸发量的10%。理想蒸发量低于设计值的主要原因是温室大棚存在玻璃透过率低、对外对流散热损失和排气热损失等问题。其中,玻璃透过率和有效通风量是最主要的因素。建议定期维护温室大棚,保证太阳辐射透过率和实际有效通风量,确保稳定达到设计蒸发量。

关键词: 太阳能; 污泥干化; 理想蒸发量; 干化效率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0024-07

Enhancing Efficiency of Sludge Solar Drying through Systematic Analysis

WU Wen-qing, MEI Xiao-jie, FANG Ning, GUO Ya-li

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: A theoretical analysis was conducted on the ideal evaporation capacity within the greenhouse of a solar drying facility in the Jianghuai region based on specific engineering practices and the principles of heat and mass conservation. The effects of key factors such as glass transmittance and ventilation volume on drying performance were systematically evaluated, and targeted improvement strategies to enhance the overall efficiency of the solar drying system were proposed. The annual average ideal evaporation capacity of the greenhouse in this facility amounted to 52% of the designed capacity, with an average relative thermal efficiency of 65% and an average absolute thermal efficiency of 36%. The analysis indicated that solar drying technology exhibited distinct seasonal variations, with the ideal evaporation capacity during winter accounting for approximately 10% of the annual total ideal evaporation. The primary reason for the ideal evaporation capacity being lower than the design value was attributed to several issues in the greenhouse system, including reduced glass transmittance, heat loss due to external convection, and heat loss associated with exhaust ventilation. Among these factors, glass transmittance and effective ventilation volume were the most influential. It is recommended to conduct regular maintenance of the greenhouse to ensure optimal solar radiation transmittance, maintain the intended effective ventilation volume, and achieve stable attainment of the designed evaporation capacity.

Key words: solar energy; sludge drying; ideal evaporation capacity; drying efficiency

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司科标业项目(2023HJ(83)-008)

通信作者: 梅晓洁 E-mail: mei_xiaojie@ctg.com.cn

污泥太阳能干化技术是一种低温热干化技术,通过利用温室大棚收集太阳能,对放置其中的污泥进行加热干化^[1-3]。与其他类型污泥脱水方式相比,污泥太阳能干化技术能耗相对较低,有利于降碳减排。然而这种工艺受太阳辐射和环境温度、湿度等因素的影响,其干化能力波动幅度较大^[4],部分时段可能面临干化能力不足的问题。因此,在日常运行中,温室大棚的实际干化能力备受关注。Sorrenti等^[5]利用太阳能产生高温空气对污泥进行曝气干化,其改进的温室大棚处理能力可达 $8.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,不过客观上处理 1 t 污泥增加了约 $450 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的能耗。在宁夏地区实际温室大棚污泥干化项目中,夏季最高的水分蒸发速率为 $10.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[6]。以上研究大多是通过现场监测得出部分时段的蒸发数据,但是这些数据难以用于计算当地全年的平均干化能力,因此需要建立一套完整的数学模型,从理论上开展相关分析。

污泥太阳能干化技术的相关研究中提出了许多影响污泥干化速率的因素,比如温度、湿度、风速和太阳辐射强度等^[7-9]。由于诸如辐射强度、气温等因素难以调节,所以目前有关温室大棚的研究多涉及通风量,比如向轶等人^[7]的研究结果显示,对于无强制通风的封闭型温室,其干化效率明显低于敞口式,其原因是通风不足导致温室内部湿度过高。Masmoudi等^[10]进一步强调了通风的重要性,只有强制通风的温室干化效率才会更高。

以江淮地区某污泥太阳能干化项目为例,其设计蒸发量为 $3.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,通过历年数据计算可知,实际蒸发量仅为 $1.25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。为了剖析蒸发量差异产生的原因,笔者从系统分析的角度,基于热质守恒定律,对该厂的理想蒸发量进行了理论计算,并研究了太阳能干化系统效率的影响因素,讨论了棚体与环境的对流换热系数、玻璃透过率与发射率等结构参数和排气温度、通风量等因素对蒸发量的影响,并提出了切实有效的改进措施。

1 模型构建与监测方法

温室大棚的模型如图1所示。太阳辐射经过顶层玻璃的反射和吸收,部分进入温室大棚内。顶棚和侧壁吸收热量后温度升高,向内、向外进行辐射散热与对流换热。底部敷设的污泥一方面通过热传导对地散热,一方面吸收热量用于水分蒸发。外

部的干冷空气经过温室大棚后吸收热量升温并混合蒸发产生的水蒸气,形成的湿热空气被风机排出温室大棚。

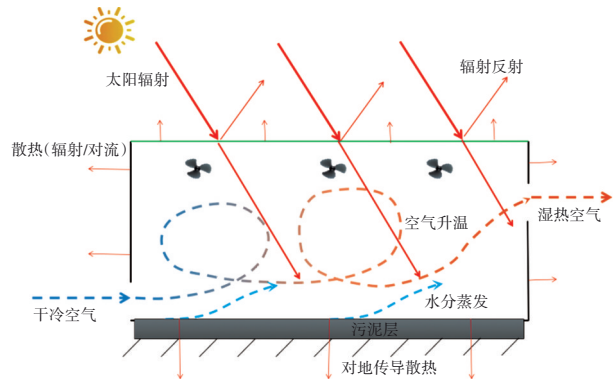


图1 温室模型示意

Fig.1 Schematic diagram of greenhouse model

本模型基于热质守恒定律,提出以下假设进行模型的简化计算:①不考虑棚内主要构筑物,如钢体柱梁和玻璃的蓄热;②温室大棚内布设循环风机和排风风机,以保证棚内空气温度分布均匀;③实际运行中,由于空气温度升高幅度最高可达 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,因此假设空气流经温室大棚后温度不降低,即空气不损失自身热量用于污泥干化;④由于当日和次日凌晨大棚内温度相近,所以在一天的时间尺度上不考虑棚内空气蓄热;⑤污泥敷设较厚,地下温度恒定,不考虑对地传导散热。

基于以上假设计算热量的收支,其中热量来源为太阳辐射穿过顶棚玻璃进入温室大棚内部的热量,主要用于棚内空气温度的升高、水分蒸发的吸收以及温室大棚对外的散热,见式(1)。

$$Q_1 = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1)$$

式中: Q_1 为透过玻璃进入温室大棚的太阳辐射的热量, J ; U_1 为空气因温度升高吸收的热量, J ; U_2 为温室大棚内水蒸气蒸发吸收的热量, J ; U_3 为温室大棚对外散热量。

针对太阳辐射量,由于太阳光线投射角度随时间变化,因此棚顶玻璃对太阳辐射的透过率 Tr 也不相同^[11],见式(2)。

$$\text{Tr} = \text{Tr}_0(1 - 0.93^{90 - \theta})(1 - \theta/1000) \quad (2)$$

式中: θ 为太阳入射角,即太阳射线与壁面法线之间的夹角,具体可由当地时间和经纬度进行计算; Tr_0 为入射角为 0° 时的玻璃透过率,取 0.7 ^[12]。

综上分析,进入温室大棚的辐射热量见式(3)。

$$Q_1 = Tr \times E \times S_T \quad (3)$$

式中： E 为太阳直射辐射热量， J/m^2 ； S_T 为温室大棚占地面积，本模型为 $2 \times 10^4 m^2$ 。

湿空气含湿量 d 是指 1 kg 干空气中所含的水蒸气量， kg/kg 。基于物质守恒，空气中含湿量的增加量即为污泥水分的蒸发量。

$$Q_m (d_o - d_{in}) = m_v \quad (4)$$

式中： m_v 为水分蒸发量， kg ； Q_m 为干空气的质量， kg 。

空气升温吸收的热量包括两部分，一部分为干空气升温吸收的热量，一部分为水蒸气升温吸收的热量。 U_1 按式(5)计算。

$$U_1 = Q_m [C_{p,a} (T_o - T_{in}) + C_{p,v} (d_o T_o - d_{in} T_{in})] \quad (5)$$

式中： $C_{p,a}$ 为干空气定压比热容，取 $1\ 006 J/(kg \cdot K)$ ； $C_{p,v}$ 为水蒸气定压比热容，取 $1\ 860 J/(kg \cdot K)$ ； T 为空气温度。以上各式中下标 in 和 o 分别表示温室大棚进口和出口的相应物理参数。

水分蒸发吸收的热量见式(6)。

$$U_2 = Q_m L_h (d_o - d_{in}) \quad (6)$$

式中： L_h 为水蒸气蒸发潜热，取 $2\ 501 kJ/kg$ 。

温室大棚的散热量包括对外的对流散热和辐射散热，分别见式(7)和式(8)。

$$U_{31} = kS_T (T_o - T_{in}) + kS_s (T_o - T_{in}) \quad (7)$$

式中： k 为对流传热系数，双层玻璃一般取 $4 W/(m^2 \cdot K)$ ； S_s 为侧面面积，取 $3\ 000 m^2$ 。

$$U_{32} = \varepsilon \sigma S_T (T_o^4 - T_{sky}^4) + \varepsilon \sigma S_s (T_o^4 - T_{in}^4) \quad (8)$$

式中： ε 为发射率，取 0.8 ； σ 为黑体辐射常数，取 5.67×10^{-8} ； T_{sky} 为天空温度，取 $230 K$ 。

为进一步求解此模型，设置输入边界条件如下：①考虑到温室大棚的实际通风能力，通风量不超过 $800 \times 10^4 m^3/d$ ；②温室大棚排气温升为 $0 \sim 20 ^\circ C$ ，排气湿度为 $50\% \sim 80\%$ 。

当地 2020 年—2022 年的月平均温度、湿度和太阳辐射量的参数见表 1。该数据参考美国海洋及大气管理局的相关数据，并利用美国国家航空航天局和欧洲中期天气中心数据进行测试，相关误差在 5% 以内(来源于羲和能源气象大数据平台)。

表 1 2020 年—2022 年环境参数

Tab.1 Environmental parameters from 2020 to 2022

月份	2020 年			2021 年			2022 年		
	平均温度/ $^\circ C$	平均湿度/%	辐射量/ $(kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	平均温度/ $^\circ C$	平均湿度/%	辐射量/ $(kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	平均温度/ $^\circ C$	平均湿度/%	辐射量/ $(kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$
1月	5.3	73.9	6 179	5.7	64.2	13 043	5.6	72.3	6 362
2月	10.2	66.7	11 327	11.4	68.6	12 205	5.9	67.4	8 333
3月	14.4	64.1	11 357	13.8	69.6	11 883	15.2	65.4	13 096
4月	18.0	58.2	16 377	17.4	68.0	10 804	19.6	65.9	14 084
5月	26.4	54.4	16 646	23.8	66.9	13 761	23.4	59.2	15 610
6月	28.5	71.2	11 798	29.0	62.8	14 958	30.6	58.3	18 661
7月	26.8	84.1	8 610	28.9	81.4	9 076	31.8	65.6	13 114
8月	30.1	77.0	12 572	28.2	79.4	12 689	33.4	55.9	14 802
9月	25.0	70.5	15 473	27.1	72.3	18 122	27.8	44.7	17 748
10月	18.2	71.6	13 012	19.7	70.9	14 390	19.4	57.2	16 571
11月	13.5	69.6	12 941	13.5	63.1	15 154	16.2	63.5	12 123
12月	5.4	65.4	11 156	8.4	59.1	13 990	5.4	55.1	12 595

为得到理想蒸发量，模型以进口和出口温差为 $0 \sim 20 ^\circ C$ (步长为 $0.1 ^\circ C$)、出口湿度为 $40\% \sim 80\%$ (步长为 1%) 的条件计算不同温度和湿度组合下的蒸发量。蒸发量集合中的最大值即为该系统的理想蒸发量。需要指出的是，在实际生产中，受现场操作条件和污泥状态的影响，实际蒸发量一般达不到理想蒸发量，但对于探究污泥干化潜力和干化系统

整体分析是有意义的。

同时，对温室大棚进行了温湿度传感器布点以监测其分布情况。具体方法为：在温室大棚 $200 m$ 的长度上均匀放置 10 组，每组 10 个温湿度传感器，均匀分布在距离地面 $0.2 \sim 4.0 m$ 的位置，并在温室大棚外侧布置太阳辐射传感器以监测辐射强度。用 esp32 单片机读取数据并嵌入 4G 模块将数据上

传至云平台。温室大棚的传感器布置与数据传输系统如图2所示。

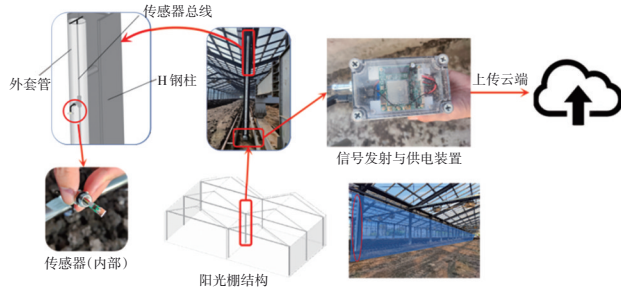


图2 传感器布置与数据传输

Fig.2 Sensor placement and data transmission

2 结果与讨论

2.1 系统分析

根据表1提供的环境参数,计算2020年—2022年的月均理想蒸发量,结果如图3所示。3年的平均理想蒸发量为 $1.91 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,仅为该项目设计蒸发量的52%,说明设计理念较为冒进。一年之中从1月—6月,基本上理想蒸发量逐月递增,6月到达波峰,7月理想蒸发量骤降,到达波谷,随后继续升高,至9月达到第二个波峰。结合当地气候参数,虽然7月平均气温较高,但由于降雨较多,平均辐射量较低,空气湿度也相对较高,因此7月的理想蒸发量尚不及4月和10月。另外值得注意的是,12月一次年2月的理想蒸发量仅相当于全年理想蒸发量的10%。由此可见,污泥太阳能干化系统的理想蒸发量与气候条件关系较大,且变化规律具有重现性。

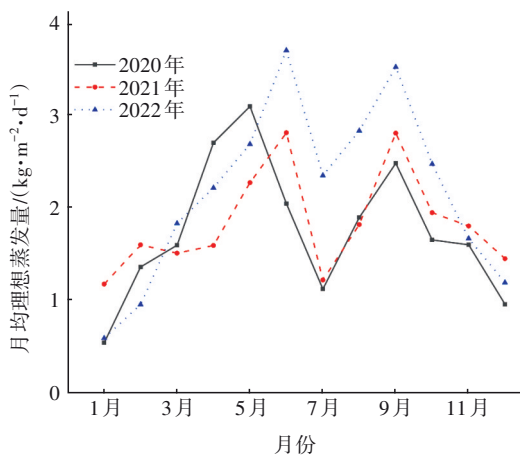


图3 2020年—2022年月均理想蒸发量

Fig.3 Average monthly ideal evaporation capacity during 2020-2022

温室大棚的稳定运行是污泥太阳能干化技术的关键之一。从图3可以发现,1月、2月、7月、11

月、12月的理想蒸发量偏低,其中1月、2月、12月三个月份相连,最易出现污泥干化能力不足以致污泥积压的情况,这也是影响温室大棚稳定运行的最大障碍。可以考虑以下2种方案进一步促进冬季污泥干化:一是引入辅助热源,比如使用热泵;二是新建污泥储存设施,暂存冬季污泥,匹配污泥处理量和污泥处理能力。

水源热泵可以有效提高干化速率^[13],但同时其去水能耗也较高,达到 $3.11 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[14],吨泥干化成本是太阳能干化技术去水能耗的5~10倍,吨泥干化成本增加80元以上。考虑成本控制因素,也可以采用污泥暂存设施,将冬季处理不达标的污泥暂存至第二年春季,缓解冬季污泥含水率不达标的考核压力,该方式运行成本相对较小,但需要协调仓储、用地、通风等事宜。

图4对污泥太阳能干化系统典型年的热效率和热损失情况进行了分析,其中相对热效率为蒸发所需热量与进入温室大棚的热量之比,绝对热效率为蒸发所需热量与太阳辐射热量之比。由图4可知,全年相对热效率和绝对热效率与理想蒸发量趋势相同,且热效率的逐月变化趋势与月均理想蒸发量一致。全年平均相对热效率可达65%,而全年平均绝对热效率仅为36%。从热损失来看,散热损失和排气热损失与热效率趋势正好相反。其中,散热损失为对流散热、辐射散热的散热量与进入温室大棚的太阳辐射热量之比,排气热损失为因湿空气升温增加的热量与进入温室大棚的太阳辐射热量之比。其主要原因是冬季温室大棚内外温差较大导致热损失增多。

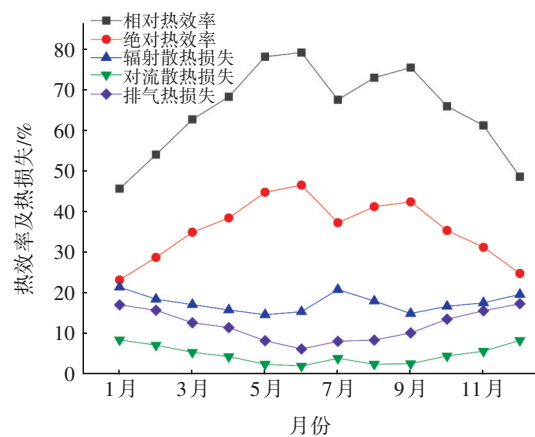


图4 每月热效率与热损失情况

Fig.4 Monthly thermal efficiency and heat loss

进一步分析温室大棚干化效率低下的原因,主要有三个:一是与相对热效率相比,绝对热效率明显偏低,即温室大棚对太阳辐射的透过率偏低;二是对外散热损失较多;三是排气热损失较大。前两个原因与结构参数有关,即玻璃的透过率、发射率和对流换热系数。通过改变模型中这三个因素的数值来探究其对理想蒸发量的影响,如图5所示。从图5(a)可以看出,随着玻璃发射率的增加,理想蒸发量呈线性减少。当发射率从0.10增加到0.85时,理想蒸发量减少了约1/6,建议采用低发射率的玻璃以降低对外辐射散热量。

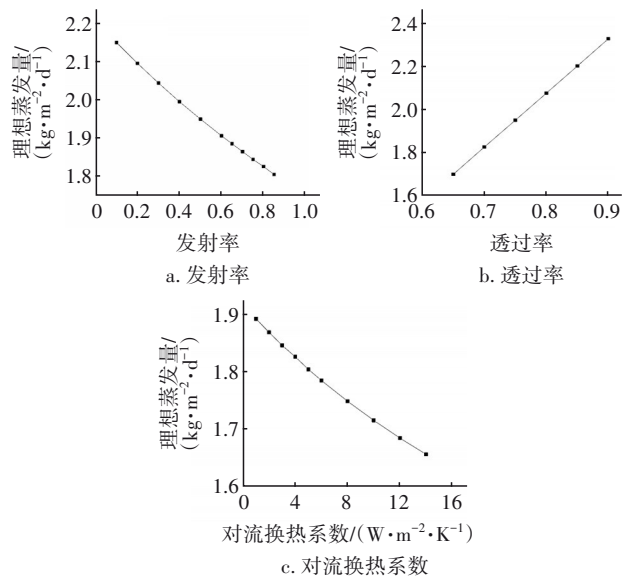


图5 发射率、透过率和对流换热系数对理想蒸发量的影响
Fig.5 Effect of emissivity, transmittance and convective heat transfer coefficient on ideal evaporation capacity

再来看透过率的影响,如图5(b)所示,随着透过率的增加,理想蒸发量呈线性增加,当透过率从0.65增加至0.90时,其理想蒸发量增加了42.4%,可见采用高透明度的玻璃可以有效提高污泥干化速率。再从对流散热的影响来看,如图5(c)所示,当对流换热系数由 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低至 $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,理想蒸发量提高了不足1/10。可见通过降低对流换热系数可提高大棚的保温性能,但对污泥干化能力的提高十分有限,也佐证了图4中对流散热损失相对较小的事实。

在实际温室大棚结构中,出于结构安全和保温考虑,顶棚和侧墙往往设置两层玻璃,但这会降低太阳辐射透过率。建议优先采用高透明度的玻璃以提高太阳辐射透过率,或定期维护保持稳定的透

过率以提高污泥干化速率,其次再考虑玻璃的保温性能等其他因素。

2.2 干化条件的控制与优化

通风是影响温室大棚内污泥干化速率的重要因素之一,也是运行人员能够主动调节的唯一因素。首先通风量的提高可以降低温室大棚内部温度,从而减少对外散热损失;其次通风量增加能够提高空气携带水蒸气的能力。根据图3的分析结果,选择2020年1月、3月和5月进行分析,图6显示了典型月通风量与温室大棚理想蒸发量的关系。从图6可以看出,理想蒸发量随通风量的增加而增大,不过通风量对理想蒸发量的影响也有边际效果,即通风量增加至一定程度后对理想蒸发量的提高效果有限。值得注意的是,在全年理想蒸发量最高的5月,其理想蒸发量受通风量的影响更大,而在全年理想蒸发量最低的1月,通风量对干化能力的提升效果影响最小。这也说明了干化条件越好,越要注意通风,以最大限度利用蒸发潜力。

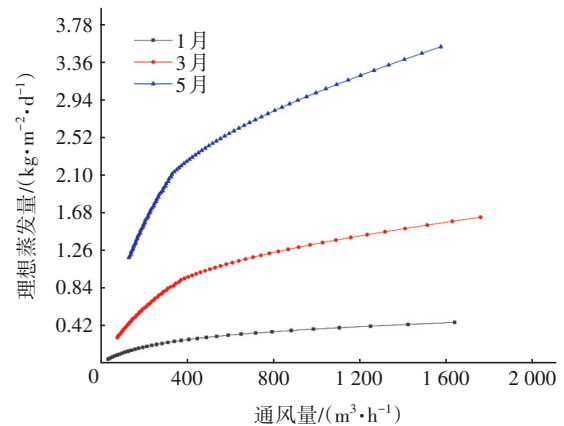


图6 通风量与温室大棚理想蒸发量的关系

Fig.6 Relationship between ventilation volume and ideal evaporation capacity in greenhouse

根据实地调查,当地温室大棚的实际蒸发量为 $1.25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,低于理想蒸发量 $1.91 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。为了进一步探究理想蒸发量与实际蒸发量存在差异的原因,对温室大棚在典型日的运行情况进行了详细分析,分别选择2024年6个典型日的晴天中午(11:30—13:30)作为分析对象,根据当日天气情况计算理想蒸发量,并通过棚内实际温度和湿度计算进出口含湿量差,从而得到实际的蒸发量与通风量,如图7所示,其中通风量占比为实际通风量与额定通风量($800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)之比。由图7(a)可知,实际

通风能力仅为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 约占额定通风量的60%。由图7(b)可知, 不同典型日实际蒸发量相当于理想蒸发量的55%~63%, 这也进一步佐证了通风量与理想蒸发量的相关性。可见, 通风量不足是导致实际蒸发量低于理想蒸发量的原因之一。

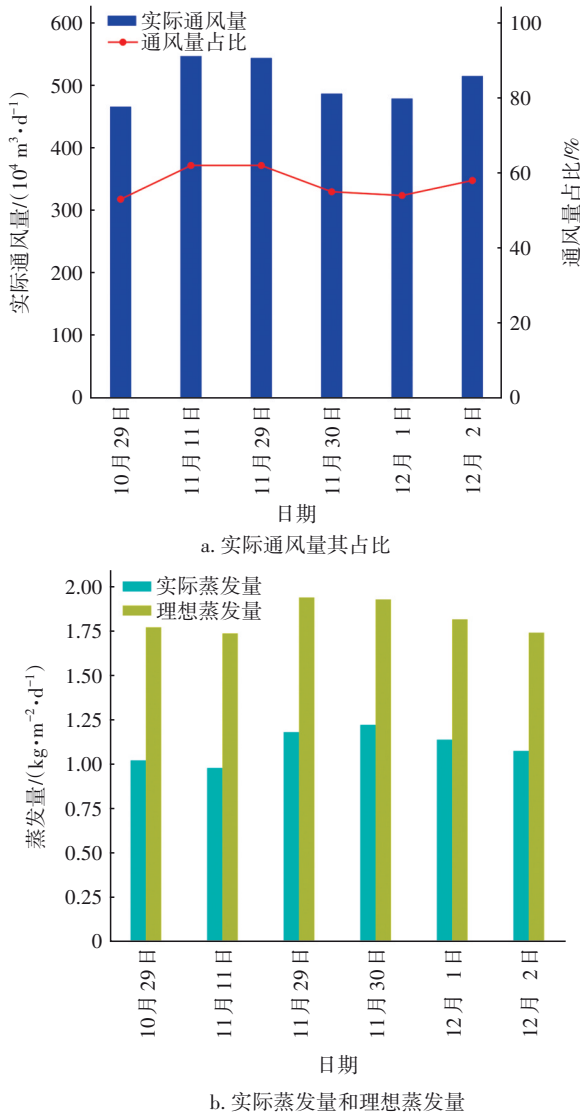


图7 典型日通风量和理想蒸发量的变化

Fig.7 Change in ventilation volume and ideal evaporation capacity during typical days

进一步分析实际通风能力不足的原因, 选取2024年12月1日进行分析, 温室大棚内部的温度和空气含湿量分布情况如图8所示(左下角为进风口, 右上角为出风口)。可以看出, 在温室大棚纵切面上均出现了中部温度和含湿量高、两侧相对较低的情况, 尤其是出风口下侧, 即云图右下角均有明显的低温和低湿区域, 说明外部干冷空气在流场的作

用下反向进入棚内, 该处出现了局部短流, 所以造成局部温度、湿度降低。由于出风口风量恒定, 一旦出现短流, 将使得进风口风量减少, 进而导致温室大棚实际通风量减少和实际蒸发量下降。

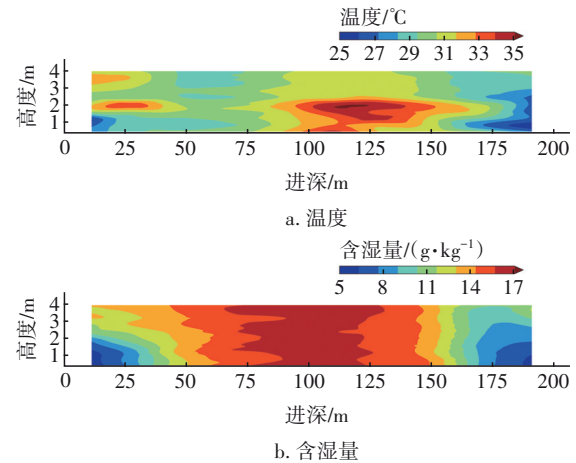


图8 温室大棚纵切面温度和含湿量分布情况

Fig.8 Distribution of temperature and moisture content in longitudinal section of greenhouse

3 结论

① 江淮地区污泥太阳能干化技术的理想蒸发量为 $1.91 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均绝对热效率仅为36%, 理想蒸发量存在明显的季节性特征, 其冬季理想蒸发量只相当于全年理想蒸发量的10%。理想蒸发量的影响因素包括玻璃对太阳辐射的透过率、玻璃发射率、对流换热系数和通风量等, 其中玻璃透过率对理想蒸发量的影响较大, 对流散热造成的热损失相对较小。另外, 增加通风量可以促进水分蒸发, 并且干化条件越好, 通风量的影响越大。

② 基于温室大棚的实地监测结果显示, 温室大棚内部中间部位温度、湿度较高, 而在出风口之下温度、湿度均偏低, 这是由于温室大棚内部流场出现了短流, 以至于实际通风量不足导致实际蒸发量偏低。由于额定通风量充裕, 建议从优化温室大棚流场着手, 进一步提高实际通风量以促进污泥干化。

③ 流场优化不涉及新增工艺环节, 成本较小, 因此技术经济性较高。相比于其他热干化技术, 污泥太阳能干化技术采用绿色可再生能源, 成本较低, 处理能力与占地面积成正比, 同时存在邻避效应, 因此适用于太阳辐射强度高、用地限制小、处置费用低的远郊城市或地区。

参考文献:

- [1] 吴青荣, 张绪坤, 王高敏. 城市污泥低温干化技术研究进展[J]. 环境工程, 2017, 35(3): 127-131.
WU Qingrong, ZHANG Xukun, WANG Gaomin. Advances on low temperature drying technology of municipal sewage sludge[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(3): 127-131 (in Chinese).
- [2] GOMES L A C N, GONCALVES R F, MARTINS M F, *et al.* Assessing the suitability of solar dryers applied to wastewater plants: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326 (Part A) : 116640.
- [3] BELLOULID M O, HAMDI H, MANDI L, *et al.* Solar drying of wastewater sludge: a case study in Marrakesh, Morocco [J]. Environmental Technology, 2019, 40 (9/12): 1316-1322.
- [4] SURESH B V, SHIREESHA Y, KISHORE T S, *et al.* Natural energy materials and storage systems for solar dryers: state of the art [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 255: 112276.
- [5] SORRENTI A, CORSINO S F, TRAINA F, *et al.* Enhanced sewage sludge drying with a modified solar greenhouse [J]. Clean Technologies, 2022, 4 (2) : 407-419.
- [6] 谭明, 罗奇, 石文政, 等. 太阳能大棚污泥干化案例分析[J]. 环境工程, 2019, 37(S1): 326-328.
TAN Ming, LUO Qi, SHI Wenzheng, *et al.* Case study on sludge drying in solar greenhouse [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(S1): 326-328 (in Chinese).
- [7] 向轶, 刘建忠, 许佩佩, 等. 太阳辐射强度对污泥干燥特性的影响[J]. 可再生能源, 2014, 32(5) : 715-722.
XIANG Yi, LIU Jianzhong, XU Peipei, *et al.* Effects of solar radiation intensity on sludge drying characteristic [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(5): 715-722 (in Chinese).
- [8] ZHENG Q S, HU Z Y, LI P G, *et al.* Effects of air parameters on sewage sludge drying characteristics and regression analyses of drying model coefficients [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 198: 117501.
- [9] LI J, YAN J G, WANG Y F, *et al.* Influencing factors of the drying rate of sludge for solar drying chamber [J]. Earth and Environmental Science, 2021, 626 (1) : 12024-12027.
- [10] MASMOUDI A, ALI A B S, DHAOUADI H, *et al.* Comparison between two solar drying techniques of sewage sludge: draining solar drying and drying bed [J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12 (7) : 4089-4102.
- [11] 许红军, 曹晏飞, 李彦荣, 等. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7) : 160-169.
XU Hongjun, CAO Yanfei, LI Yanrong, *et al.* Establishment and application of solar radiation model in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(7): 160-169 (in Chinese).
- [12] 赵欢. 设计日冷负荷用外窗-遮阳系统日射得热计算模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
ZHAO Huan. Solar Radiation Heat Calculation Model of Exterior Window-shading System for Design-day Cooling Load [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022 (in Chinese).
- [13] 徐政, 王哲, 李光明. 光伏-热泵型与集热型太阳能污泥干化对比研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8) : 185-191.
XU Zheng, WANG Zhe, LI Guangming. Comparative study on solar sludge drying with schemes of PV-heat pump and solar collector [J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(8): 185-191 (in Chinese).
- [14] 虞佳庆, 张丽丽, 武丹丹, 等. 污泥低温干化工艺的工程实践与运行成本分析[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6): 102-108.
YU Jiaqing, ZHANG Lili, WU Dandan, *et al.* Engineering practice and operation costs analysis of sludge low-temperature drying process [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6): 102-108 (in Chinese).

作者简介: 吴文庆(1995-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为污泥处理处置与资源化。

E-mail: wu_wenqing@ctg.com.cn

收稿日期: 2025-01-22

修回日期: 2025-03-21

(编辑: 任莹莹)