掐指一算，脊位当道”——中国太阳能温室脊部位置比如何影响稀有中草药的生长？

截至2018年底，我国日光温室面积已经达到57.7万公顷。中国日光温室（CSG）通过充分利用太阳能，在北方地区（北纬42.5°地区）解决了冬季蔬菜供应问题，使蔬菜常年增产成为可能，同时无需辅助供暖，保证了蔬菜产量，节约了大量能源，取得了显著的经济效益和社会效益。CSG对于推进农业现代化和促进中国园艺业的发展具有潜在的重要作用，同时对于可持续发展也有重要的贡献。

CSG由北墙、山墙以及南北屋顶组成。其中，南屋顶白天盖上薄膜，晚上则盖上保温被。作物的生长受到多种环境因素的影响，包括温度、太阳辐射、二氧化碳浓度、相对湿度等，尤其温室的热环境对于农作物的生长尤为重要。创造合理的光热环境是农作物生长发育的关键因素。若温室结构设计不当，可能导致温室内温度调节不理想，无法为作物提供最佳生长条件。因此，日光温室的建筑空间参数，如跨度、屋脊高度、北屋顶水平投影长度和北墙高度等，对于温室的热环境起着至关重要的作用。

南屋顶的大小不仅决定温室白天接收太阳能的多少，还直接影响夜间向外界释放的热量的多少。南屋顶夜间铺有保温被，但其保温效果仍远低于北墙。估计通过南屋顶的热量损失占整个温室总热量损失的70-80%。增加南屋顶面积可以使白天更多太阳能进入温室，但也会导致夜间热量散失增加。北屋顶作为非透明围护结构，主要用于保温，但由于北屋顶内表面的日照时数有限，其蓄热量非常有限。若北屋顶面积过大，会影响南屋顶拦截太阳能的能力，不利于作物光合作用；而面积过小，则会导致夜间热量损失过多。因此，合理确定南、北屋顶面积对于平衡进入温室的太阳能量、减少温室夜间供暖非常关键。

目前，大多数研究者主要关注南屋顶和北屋顶的形态参数对日光温室热环境的影响。虽然增加南屋顶面积可以增加进入温室的太阳能量，但由于扩大的南屋顶在夜间释放的热量更多，因此能量增加的效果有限。北屋顶的投影宽度和北墙的高度是根据不同日期直射阳光在北墙上的投影高度变化而调整的。然而，对于南北屋顶组合的综合分析信息还比较缺乏，也没有研究耦合南北屋顶参数的影响。

因此，有必要研究屋脊水平位置对日光温室热环境的影响，以优化白天进入温室的太阳能量和夜间温室的热量散失。这样的研究可以为日光温室的设计和性能提供更有效的指导和改进。

本研究采用了一个新的参数，即屋脊位置比（RPR），用以描述南、北屋顶之间的动态依赖关系，并揭示了南、北屋顶对日光温室热环境的影响机制。以往的实验都是在现场进行的，可能存在一些差异，例如不同作物条件、墙壁高度或厚度、材料等因素。同时，传统实验研究面临不可重复性、地域限制和难以获取全部信息等问题。因此，我们需要更多的研究来在相同条件下比较日光温室，并选择合适的RPR。

为了解决这些问题，本研究使用了仿真模型CSGHEAT来估计日光温室每小时的供暖需求。但考虑到CSGHEAT模型假设墙壁和土壤的太阳辐射是均匀分布的，不能准确计算温室内太阳能的分布。因此，我们基于计算流体动力学（CFD）数值模拟方法建立了一个新的数学模型，综合考虑了日光温室的结构特点。与CSGHEAT模型相比，我们的模型可以准确计算墙壁和土壤等围护结构的三维热通量分布，使得计算结果更加真实。

在模型验证通过后，我们使用该模型分析了不同RPR对日光温室热环境的影响规律。我们建立了九个不同RPR（从0.10到0.45）的模型，保持相同的边界和初始条件。首先，我们比较了不同RPR下日光温室的温度分布，包括温室内空气和固体表面的最高和最低温度，以及土壤和北墙的内部温度分布。其次，通过对模型模拟结果进行统计分析，我们研究了RPR对进入温室的太阳能量的影响。最后，我们分析了不同时刻RPR对温室围护结构的放热能力的影响。

通过这些研究，我们可以更好地了解不同RPR对日光温室热环境的影响，为合理选择RPR提供科学依据。此外，采用CFD数值模拟方法还可以避免实验中不可避免的不确定性，从而更准确地模拟日光温室的热环境。

该研究在沉阳农业大学园艺设施设计与环境控制研究所（北纬41.8°，东经123.4°，海拔高度42 m）进行了数值模拟和实验验证。在实验中，温室内没有种植农作物，并且不考虑温室内的通风和湿度交换条件，将实验温室模拟为一座空建筑，以得到与这些因素无关的结果。实验温室由北墙、北屋顶、南屋顶和温室下方土壤组成，跨度为10m，长度为60m，屋脊高为6m。温室朝南，方位角为南偏西7°。北墙内部砌0.37m厚的粉煤灰砖，外部砌0.11m厚的聚苯板，高度为3.8m。白天（8:30-16:00）用薄塑料膜覆盖南屋顶，让阳光进入并被温室吸收；夜间（16:00-8:30+1天）用0.03m厚的保温被覆盖南屋顶，保持温室内的热量。实验进行的时间为2017年1月1日至28日，为典型严冬时期。

实验连续监测了24小时的日光温室内部热环境，获得一天内的综合演化周期（即从0:00到第二天0:00）。室内外气温测量点为1至7号。为了有效分析温室的小气候，还在距离温室外部1.0m处安装了TYD-ZS2环境数据记录仪，监测温室外部温度，提供环境数据。数值模拟使用了六个温度测量点来获取温室内的空气温度数据，每分钟测量一次温度，以获得准确的结果。

温室中传热的传输方程基于连续性、动量和能量方程，可以用一系列方程来表示。为了获得更快的收敛速度，对于大多数自然对流问题，采用了标准k-ε湍流模型，该模型已被证明在类似条件和环境下是有效的。

总之，该研究在沉阳农业大学进行了温室热环境的数值模拟和实验验证，为了排除其他因素的干扰，实验温室内没有种植农作物。通过对温室内外的温度数据进行监测和模拟，研究了温室内的热环境特性。

该研究采用了瞬态三维模型来描述日光温室内的微气候随时间的动态变化。边界条件和初始条件是根据实际测量数据确定的。最初温室内外的气温分别设定为12℃和-20℃。边界条件主要包括实验温室内外的南北屋顶、土壤、北墙等设置。

在8:30至16:00期间，南屋顶覆盖薄塑料膜，其余时间覆盖保温被。用户定义的功能被用来将定制的室外温度应用于南北屋顶和北墙的外表面。北墙、土壤、南北屋顶的内表面温度初始分别设定为17℃、15℃、12.5℃和10℃。

数值模拟中采用有限体积法来求解离散流场，半隐式压力关联方程法（SIMPLE）算法用于求解守恒方程。梯度离散方案的解决方案设置为基于最小二乘单元。压力、密度、动量和能量的离散方案均配置为二阶迎风方案，而k和ε方程配置为一阶迎风方案。压力松弛因子配置为0.3，密度和体积力以及湍流粘度和能量均配置为1，k和ε配置为0.8，动量配置为0.7。连续性方程、动量方程、k方程和ε方程的收敛精度配置为1×10^-3，能量方程和辐射方程的收敛精度配置为1×10^-6。

通过这些设定，研究可以模拟出日光温室内部的热环境随时间的变化，以及不同部位的温度分布。这些模拟结果将有助于更好地理解温室内的气候特性和优化温室设计和环境控制。

为了验证CFD数值模型的准确性，研究人员将模拟得到的温度与相同环境条件下实验测得的温度进行比较。他们将每个测量点（P1-P6）的平均气温作为实验结果，并与模拟得到的平均气温进行对比。图4展示了内部平均气温随时间变化的数值模拟结果与实验数据的对比。将整个模拟周期的数值结果与实验结果进行比较，发现测量和模拟的平均绝对温差为0.22°C，平均相对误差约为9.5%。这表明所提出的数学模型高度准确地描述了温室内发生的过程。需要注意的是，由于热电偶外壳受到太阳辐射的加热并具有一定的保温功能，导致数值结果略低于白天的实际测量值，而稍高于保温被展开后的实际测量值[25]。

在热环境分析方面，冬季作物栽培期间，需要密切监测温室内部空气、土壤和北墙的温度分布。空气环境直接影响农作物的生长，而土壤环境则直接影响农作物根系的生长。北墙作为温室中最重要的储放热围护结构，直接影响着内部空气的温度稳定性。图5展示了在不同RPR条件下，温室中间截面在几个典型时刻的温度分布。图中标注的温度是温室内的平均温度。从图5a和5b可以观察到，当RPR增加到0.3时，温室内白天最高温度的出现时间将延迟（从14:00到15:00）。此外，RPR对温室内白天温度的空间分布也产生显著影响。至于夜间最低温度，从图5c可以看出RPR对其影响相对较小，具体细节将在后续节目中详细分析。

图7展示了RPR对空气和固体表面最高和最低温度的影响。图7a的结果显示，随着RPR的增加，最高气温和出现时间发生变化，最高气温总体呈下降趋势。RPR增加时，南屋顶面积减少，进入温室的太阳能量减少。当RPR达到0.22时，最高气温略有上升，这表明进入温室的太阳能量与释放到室外的热量达到平衡。值得注意的是，最高气温的出现时间在RPR约为0.3左右时交替出现。也就是说，当RPR小于0.3时，最高气温出现在14点，因为南侧屋顶面积相对较大，上午有更多的太阳能进入温室，白天气温上升幅度较大，升温速度较快，太阳能量的增加无法抵消冷却效果，导致最高内部气温出现在14点。然而，当RPR大于0.3时，进入温室的太阳能量相对较低，空气温升较低，升温速度较慢。相应地，散热面积也减少，能够抵消冷却效果，温室内储存的热量难以散发，导致内部气温最高为15点。因此，总体而言，随着RPR的增加，最高气温下降，但当RPR增加到一定值时，最高气温略有上升。图7a还显示了RPR对土壤表面最高温度的影响。当RPR小于0.3时，土壤表面最高温度的出现时间相对于空气延迟，因为土壤是温室内最大的蓄热体，具有稳定的热力学性质和较大的比热容。从图7a可以看出，北墙面最高温度在RPR约为0.15左右时交替变化。当RPR大于0.15时，北墙表面最高温度出现在15点。与土壤相比，北墙具有更好的储热和释热性能，直接影响内部空气的温度变化和稳定性。因此，北墙的最高温度也呈现出这种交替现象。图7a根据曲线的斜率可分为三个RPR区间，分别为0.1-0.22、0.22-0.4和0.4-0.45。这说明不同RPR区间内各部位最高温度的下降幅度随着RPR的增大而增大，因为随着RPR的增加，进入温室的太阳能量减少，散热面积减少，围护结构与内部空气之间的对流换热增强。

图7b显示了夜间最低温度随RPR增加的变化。最大气温差为0.3°C。由于白天气温的滞留作用，当RPR约为0.22时，温室各部位的最低温度达到峰值。随着夜间RPR的增加，土壤表面和北墙表面的最大温差分别为0.38°C和0.44°C。与最高温度的变化相比，随着RPR的增加，各部位最低温度差异并不明显。最低气温主要受土壤、北墙和内部空气之间自然对流的影响。土壤和北墙是主要的放热体，直接影响最低气温的变化趋势。RPR对温室各部位夜间最低温度的影响较小，因为土壤和北墙的大小几乎不随RPR的变化而变化。夜间内部气温主要由温室围护结构维持。

图8显示了RPR对不同深度土壤温度的影响。从图8a可以看出，随着土层深度的增加，土壤温度降低。当土层深度小于0.17 m时，RPR对温度分布影响较大。然而，当土层深度大于0.17 m时，尽管RPR发生变化，土壤温度却保持不变。图8b显示了RPR对温室土壤不同深度温度的影响。可以看出，随着土层深度的增加，土壤温度先升高后降低，最高温度出现在距土表以下约0.17 m处。当RPR大于0.3时，土壤蓄热层变薄。此外，全天平均土壤温度随着RPR的增加而降低。这表明白天土壤吸收的太阳能量减少，土壤蓄热层变薄，土壤与内部空气之间的对流传热增强，保持了夜间气温的稳定。

图9显示了RPR对北墙不同深度温度的影响。从图9a可以看出，随着北墙深度的增加，温度先升高后降低。最高温度位于距北墙面约0.1 m处，RPR为0.22和0.45时最高温度相差0.57°C。当北墙深度大于0.1 m时，尽管RPR发生变化，北墙温度保持不变。图9b显示了RPR对温室北墙不同深度温度的影响。可以看出，随着北墙深度的增加，温度先升高后降低。最高温度距北墙面约0.17 m，RPR为0.22和0.45时最高温度相差0.27°C。尽管RPR发生变化，北墙蓄热层保持不变。这表明RPR对北墙温度分布的影响很小。与土壤相比，北墙更能调节与内部空气的自然对流。北墙换热能力强，蓄放热性能好。

3.3. 热环境的主要原因：能量分析

3.3.1. 太阳能输入

图10显示了不同RPR下南屋顶面积、北屋顶面积和太阳能拦截的效果。值得注意的是，随着RPR的增加，三个影响因素的变化几乎呈现线性趋势。图11显示了不同RPR的北墙和土壤吸收太阳能的影响。相比之下，南屋顶吸收的太阳能与土壤和北墙相比可以忽略不计。随着RPR的增加，土壤和北墙吸收的太阳能量逐渐减少。而且，土壤比北墙吸收了更多的太阳能。结果还表明，与北墙相比，RPR的变化影响了土壤对太阳能的吸收（减少了5.90%）（减少了5.15%）。这是因为温室内土壤面积大，热性能稳定。

根据方程（3.1）描述的RPR x与进入温室的太阳能之间的关系Sa - nw，当RPR为0.1~0.45时，符合以下相关方程（3.1）。

Sa - nw = -1819.29x + 4440.88，R^2 = 0.99

方程（3.2）和（3.3）描述了RPR对北墙和土壤吸收太阳能的影响。

Sa - nw = -69.28x + 1063.84，R^2 = 0.99

Sa - s = -307.57x + 1826.96，R^2 = 0.99

以上结果表明，随着RPR的增加，温室内各部位对太阳能的吸收减少，特别是土壤对太阳能的吸收受到影响最大。这些结果对于理解温室的热环境和优化温室设计具有重要意义。

图12展示了不同时刻RPR对释放热能的影响。从图12a和b可以看出，热量主要通过南屋顶散失。随着RPR的增加，白天和夜间通过南屋顶的热量损失分别减少了181.99 MJ（30.12％）和217.75 MJ（28.90％）。北墙和土壤中储存的热量在热量释放过程中发挥着重要作用。白天，北墙释放的热量最多，而夜间，土壤释放的热量最多。由于土壤和北墙的面积保持不变，它们释放的热量波动很小。值得注意的是，北屋顶释放的热量随时间变化。当RPR小于0.25（白天）和0.22（夜间）时，北屋顶向温室释放热量，随着RPR的增加，释放的热量减少。当RPR大于0.25（白天）和0.22（夜间）时，图12c显示了围护结构对全天释放热量的影响。其变化趋势与最低内部空气温度的变化趋势一致。结果表明，当RPR增加到一定值时，北屋顶向温室内部释放的热量小于向室外释放的热量。因此，北屋顶的面积不宜过大。

释放热能之间的关系由方程（3.4）描述，具体数值见表3。

结论部分指出，本研究采用了CFD数值模拟与实验相结合的方法建立数学模型，分析了RPR对日光温室热环境的影响。随着RPR的增加，白天最高气温总体呈下降趋势。然而，当RPR增加到0.22时，最高气温略有增加。当RPR增大到0.3时，温室内最高气温的出现时间将会延迟。北墙的最高温度也捕捉到了这种另类现象。不同RPR区间内各部位最高温度的下降率随着RPR的增大而增大。RPR对温室各部分夜间最低温度的影响相对较小。

此外，还建立了RPR与进入温室的太阳能、北墙吸收的太阳能、土壤吸收的太阳能以及温室围护结构释放的热能之间关系的数学模型。随着RPR的增加，进入温室的太阳能量减少。RPR的变化对土壤吸收太阳能的能力（减少5.90%）的影响大于北墙（减少5.15%）吸收太阳能的能力。随着RPR的增加，土壤蓄热层逐渐变薄，但北墙蓄热层基本保持不变。同时，随着RPR的增加，南屋顶热损失的效果更大。

总体而言，该研究结果对于理解温室的热环境和优化温室设计具有重要意义。未来的工作可以进一步优化中国日光温室的结构设计参数，并加入湿度子模型以研究夜间关闭时相对湿度较高的相关问题。

参考文献

张华, 李明, 王伟. 温室日辐射平衡比对温室气候影响的数值模拟研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 222-230.

王翔宇, 杨根科, 刘爱华, 等. 地埋式温室冬季采暖对比试验研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 218-225.

王莉, 朱志英, 王鹏, 等. 太阳能辐射比对西北地区典型冬季日光温室环境的影响[J]. 中国农业气象, 2020, 41(1): 15-22.

Liu Y., Liu J., Zhao D., et al. Experimental study on thermal performance of a novel greenhouse with different solar radiation directions[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 36-44.

Cui Y., Chen Y., Duan J., et al. Effect of ridge-pan ratio on temperature distribution in a solar greenhouse for cucumber production[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114014.

Zhang Y., Zhu G., Yang Q., et al. An improved multi-variable climate control strategy for greenhouse based on RPR index[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106084.