

DOI: 10.5846/stxb202106211652

李建波, 闫云飞, 高伟, 申开明, 张承华, 李钠钾, 江厚龙, 汪代斌. 生物质发酵产热-小型温室棚联用对春冬季烟苗生长温度调控的数值研究. 生态学报, 2022, 42(19): 8002-8014.

Li J B, Yan Y F, Gao W, Shen K M, Zhang C H, Li N J, Jiang H L, Wang D B. Numerical study on temperature control of tobacco seedlings in spring and winter using a biomass fermentation heat production-small greenhouse combination. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8002-8014.

生物质发酵产热-小型温室棚联用对春冬季烟苗生长温度调控的数值研究

李建波¹, 闫云飞^{1,*}, 高伟¹, 申开明¹, 张承华¹, 李钠钾², 江厚龙², 汪代斌²

¹ 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

² 重庆烟草科学研究所, 重庆 400715

摘要: 小型温室棚作为农业生产的重要设施, 可为农作物创造一个温度适宜的、受保护的的生长空间, 保证作物正常生长、促进作物早熟。以确保重庆地区春冬季烟苗正常发育、维持室内适宜的土壤温度为导向, 对温室棚内温度进行了试验和数值模拟, 探究了温室棚内温度分布规律, 并在此基础上分析生物质发酵产热对温室棚内土壤温度场的影响。结果表明: 试验中埋设稻壳的温室棚内土壤温度平均提高 3.5 °C 且温室棚中平均温度低于 10 °C 的天数明显减少。埋设稻壳的温室棚中烟苗茎高和叶片数增长值最大, 平均茎高从移栽时的 7.8 cm 增长到了 12 cm, 叶片数从平均 5 片增长到了 11 片, 均大于未埋设稻壳试验组, 这表明土壤中埋设稻壳有助于烟草的生长发育。数值研究表明温室棚内不同深度的土壤层温度变化状况一致, 均呈现先降低后升高再降低的趋势。地温随土壤深度的增加而降低, 地表下 10 cm、20 cm 的土壤层区域温度高于 10.6 °C、8 °C, 有利于烟苗在低温环境下正常生长。且土壤温度存在一定的昼夜温差, 更利于烟苗发育。埋设稻壳的温室土壤层温度变化趋势与未埋设稻壳的温室一致, 但其土壤层平均温度、最低温度至最高温度以及昼夜温差分别升高了 2.3 °C、1.1—5.5 °C、4.8 °C。试验和数值研究结果表明稻壳发酵产生的热量可以提高和维持温室室内土壤温度, 对土壤具有保温和热量补给的作用。

关键词: 小型温室棚; 烟苗; 数值模拟; 温度场; 稻壳发酵产热

Numerical study on temperature control of tobacco seedlings in spring and winter using a biomass fermentation heat production-small greenhouse combination

LI Jianbo¹, YAN Yunfei^{1,*}, GAO Wei¹, SHEN Kaiming¹, ZHANG Chenghua¹, LI Najia², JIANG Houlong², WANG Daibin²

¹ Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Chongqing Institute of Tobacco Science, Chongqing 400715, China

Abstract: As an important facility for agricultural production, small greenhouses can create a protected growing space with suitable temperatures for crops to ensure normal growth and promote early crop maturity. In this study, the aim is to ensure the normal development of tobacco seedlings in spring and winter in Chongqing and to maintain a suitable soil temperature in the greenhouse. Experiments and numerical simulations of greenhouse shed temperatures were carried out to investigate the temperature distribution pattern inside the greenhouse. On this basis, the effect of heat production from biomass fermentation on the soil temperature field in the greenhouse was also analyzed. The results showed that the soil temperature in the greenhouses with buried rice hulls increased by an average of 3.5 °C and the number of days when the average temperature in the greenhouses below 10 °C was significantly reduced. The largest increases in stem height and leaf number of tobacco

基金项目: 中国烟草总公司重庆市公司科技项目 (NY20190401070012)

收稿日期: 2021-06-21; 网络出版日期: 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yunfeiyan@cqu.edu.cn

seedlings were observed in the greenhouses with rice hulls. The average stem height increased from 7.8 cm at transplanting to 12 cm and the average number of leaves increased from 5 to 11, both of which were greater than in the experimental group without rice hulls. This indicates that the burial of rice hulls in the soil was beneficial to the growth and development of tobacco seedlings. The numerical study showed that the temperature of the soil layers at different depths in the greenhouse shed varied consistently, all showing a trend of decreasing, then increasing, and finally decreasing. The ground temperature decreased with the increasing soil depth. The temperature of the soil layer 10 cm and 20 cm below the surface was higher than 10.6 °C and 8 °C, which was conducive to the growth of tobacco seedlings. And there existed a certain diurnal temperature difference in soil temperature, which was more beneficial to the development of tobacco seedlings in low temperature environment. The trend of soil temperature in the greenhouse with buried rice hulls was same as that in the greenhouse without buried rice hulls, but the average temperature, the minimum to the maximum temperature, and diurnal temperature differences in the soil layer increased by 2.3 °C, 1.1—5.5 °C, and 4.8 °C, respectively. The results of experimental and numerical studies showed that the heat generated by the fermentation of rice hulls could raise and maintain the soil temperature in the greenhouse, providing insulation and heat recharge to the soil.

Key Words: small greenhouse sheds; tobacco seedlings; numerical simulation; temperature field; heat production by rice hulls fermentation

我国寒冷地区目前作物设施主要为塑料大棚、日光温室。塑料大棚是以塑料薄膜为采光面的农业生产设施,是中国南方地区植物栽培的主要设施类型,具有透光好、建造方便等优点^[1-2]。与日光温室相比,大棚没有墙壁作为保温蓄热体,其保温性能差^[3-4]。同时由于气候、地理位置等因素,直接利用温室自身内部环境往往不能为作物提供最佳生长环境。土壤温度是影响作物生长发育的关键因素之一,且与温室内空气温度相比,调控土壤温度对于作物发芽、出苗等生长更加直接有效^[5-6]。马忠明等^[7]通过不同覆膜种植试验发现,不同覆膜方式下土壤温度平均提高 3.3 °C。闫晓俊等^[8]针对杉木幼苗设置了大气增温和土壤增温双因子试验研究,结果表明土壤增温对冬季叶片净光合作用速率有显著促进作用,有利于幼苗正常生长。对比以往的土壤增温方式,生物质发酵技术可通过分解作物秸秆、稻壳等,从而释放出大量热量和二氧化碳,不仅能提升土壤肥力^[9],还能够提高秋冬季节温室棚内土壤温度,实现烟草、番茄、黄瓜、西瓜等作物的反季节栽培,对于冬季温室作物生长具有重要意义^[10-12]。肖金鑫等^[13]研究发现,酿热发酵产热使得单层膜覆盖的大跨度的温室平均地温比普通日光温室高 1.4—2.0 °C,在室外最低气温为-14.3 °C 的极端天气下,酿热温室内夜间温度仍不低于 5.3 °C,高于对照组 3.8 °C,有利于作物的正常生长。孔政等^[14]通过调节发酵池产热,维持大棚温度的稳定,其增温时间长、增温效果显著提高。Poblete 等^[15]和 Neugebauer 等^[16]将太阳能温室与堆肥方式相结合形成了温室堆肥系统,结果表明该系统的土壤温度明显高于其他对照组,所研究的堆肥样品有机质含量均降低,温室内的温度得到了保持,种子萌发和根系生长均得到促进。

以温室成分和气象条件,国内外学者进行了数值模拟的方法来研究温室环境的变化规律。张艳等^[17]建立了温室的三维稳态数值模型,对日光温室内浅层土壤温度场进行了分析,发现不同深度土壤温度变化趋势一致;随着土壤深度增加,温度波动变小。Zhang 等^[18]和 Taki 等^[19]对温室建立了动态数学模型,对温室内各表面属性、内部温度场进行分析,研究发现不同温室表面太阳能辐射比例不一样。对比不同类型的日光温室,发现东西方向布置的单跨温室在寒冷季节接受的太阳辐射最大。Zhang 等^[20]和 Wang 等^[21]利用计算流体力学(CFD)模拟动态的太阳热负荷对温室温度场的影响,优化了温室内部温度环境,结果表明室内温度与太阳辐射变化规律一致。

尽管日光温室数值模拟得到了大量的研究,但是对于小型温室棚的内环境模拟研究较少,特别是小型温室棚与发酵产热增温联用的数值模拟研究较少。该联用系统有效提高了温室土壤利用率,并保证了温室良好的保温性能。因此,本文以重庆市北碚区西南大学试验基地小型塑料温室棚为载体,采用温室棚室内外土壤、空气温度数据的试验跟踪测量,并对温室棚内空气及土壤层温度场进行三维非稳态的数值模拟,探究了温室

棚内温度场分布规律,在此基础上分析了生物质发酵产热对温室棚内土壤温度场的影响,以期为高海拔寒冷地区烟草幼苗寻找其合适栽培环境提供科学依据。

1 试验

1.1 试验温室

试验温室位于重庆市北碚区西南大学试验基地(东经 $106^{\circ}25'45''$, 北纬 $29^{\circ}49'18''$), 试验日期为 2020 年 12 月 20 日至 2021 年 1 月 10 日。试验温室采用塑料薄膜覆盖的框架结构, 长 4 m, 宽 1 m, 高 0.6 m, 温室外覆盖层材料为 0.15 mm 厚的 PE 膜。日光小型温室棚内每隔 1 m 建有 $12\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的酿热槽, 其深度为 12 cm, 内埋设物为稻壳, 如图 1 所示。

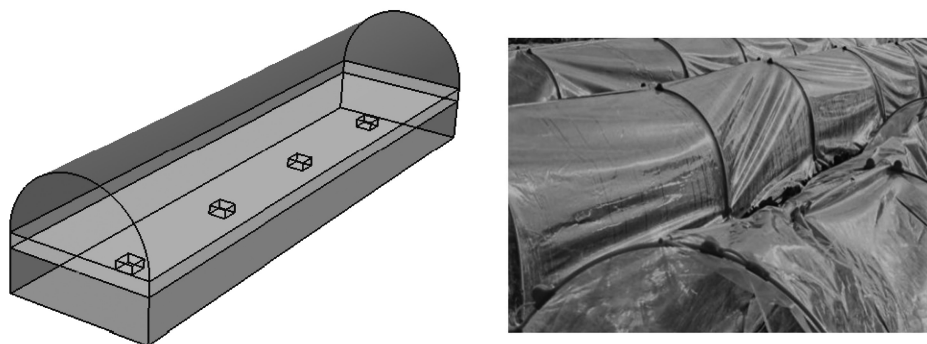


图 1 温室棚的结构图及其实物图

Fig.1 Structural diagram of the greenhouse shed and its physical drawing

1.2 试验方法

针对烟苗移栽后温度的测量, 项目组采用远程温度测量仪测量各组中的温度变化状况。无温室棚试验组设置两个温湿度测量仪分别测量空气温度及土壤温度, 其中测量土壤温度时, 将测量仪的探头套上防尘套后插入烟苗根部附近的土壤中。温室棚内同样采用两个温湿度测量仪检测棚内空气的温度及棚内土壤温度, 同时采用直尺对烟苗的径高(H)进行测量, 如图 2 所示。试验保持全天候温度监控, 温湿度测量仪每 10 min 记录一次数据以确保其精度。



图 2 试验测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of the test measurement

a: 温室棚的搭建示意; b: 温室棚内、外湿度的测量; c: 温室棚外烟苗的高度测量; d: 温室棚内烟苗的高度测量

2 数学模型与数值方法

2.1 几何模型与网格划分

选取温室内空气区域(1 m×1 m×0.6 m)和底部土壤长方体区域(1 m×1 m×0.3 m)为计算域。采用非结构网格对计算域进行离散化处理,在温室两侧对网格进行加密处理,如图 3 所示,以保证较好的网格质量。经网格无关性验证后,选取模型的节点数为 339625,网格数为 356328。

2.2 控制方程

温室在日光的照射下其内部条件会发生微小变化,涉及到空气的低速流动,能量的交换与传递。采用控制体积法进行分析,相关控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

式中, S_m 为分散相到连续相的质量, ρ 表示密度, u_i 表示*i*方向上的速度, x_i 为*i*方向上的微元体长度。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中, p 表示静压, τ_{ij} 表示了应力张量, g_i 表示在*i*方向上的体积力, F_i 表示在*i*方向上的外部体积力。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

式中, T 表示热力学温度, c_p 代表比热容, u 表示速度, λ 为导热系数, S_T 为内热源项。

2.3 太阳辐射模型及边界条件

采用太阳射线追踪模型,适用于三维模型,能够计算进入计算域的太阳射线的辐射影响。射线追踪方法基于光线跟踪算法来模拟太阳辐射的动态变化。太阳辐射对温室内微环境分布的影响与太阳方位角和温室地理位置、季节、时间及晴朗指数密切相关。为真实地模拟以上因素的影响,采用 Solar Ray Tracing 计算方法,通过 Solar calculator 设定试验地区的地理位置(106°25'45"E,29°49'18"N)、时区(+8)、计算域方向以及晴朗指数。给定具体时间,可计算出当时的太阳辐射强度。

试验棚位于室外,其温度为 4—8 ℃,温度较低,棚与环境存在对流换热,忽略薄膜导热,空气视为理想气体。温室的覆盖层、地面均按照壁面边界条件处理。温室内外能量通过覆盖层以对流、热传导和辐射三种形式进行热交换。设定覆盖层为半透明材质,覆盖层的热边界条件为热对流传导类型,以实现覆盖层内外空气的热交换^[22]。地表面与温室内空气和土壤层均存在热量传递,将地表面设置为流固耦合面,下部土壤长方体的侧面设置为第三类边界条件。夜间,考虑土壤长方体底部向外传热的热流密度为 1 W/m²^[23];生物质发酵材料选用稻壳。材料物性参数^[17,24-25]如表 1。

3 结果与讨论

3.1 田间试验

试验为探究温室棚和发酵产热联用对土壤温度的影响,对 2020 年 12 月 20 日至 30 日各组温度进行测量,每隔一天处理一次数据,如图 4 所示。试验 1—6 的外界环境变量相同,其中,试验 1 为空白对照组,仅施

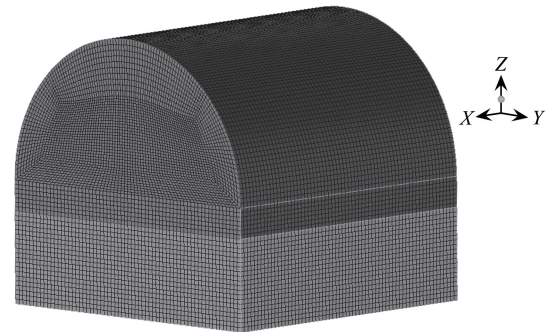


图 3 温室棚模型网格划分

Fig.3 Greenhouse shed model meshing

表 1 材料的物性参数
Table 1 Physical parameters of the material

	导热率 Thermal conductivity/ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	密度 Density/ (kg/m ³)	定容热容 Volumetric specific heat capacity/ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	吸收率 Absorption rate	发射率 Emissivity
稻壳 Rice hull	0.06	120	2010		
空气 Air	0.0242	1.225	1006		
土壤 Soil	1.518	2000	1800	0.8	
PE 薄膜 Polythene film	0.15	1360	1050	0.25	0.75

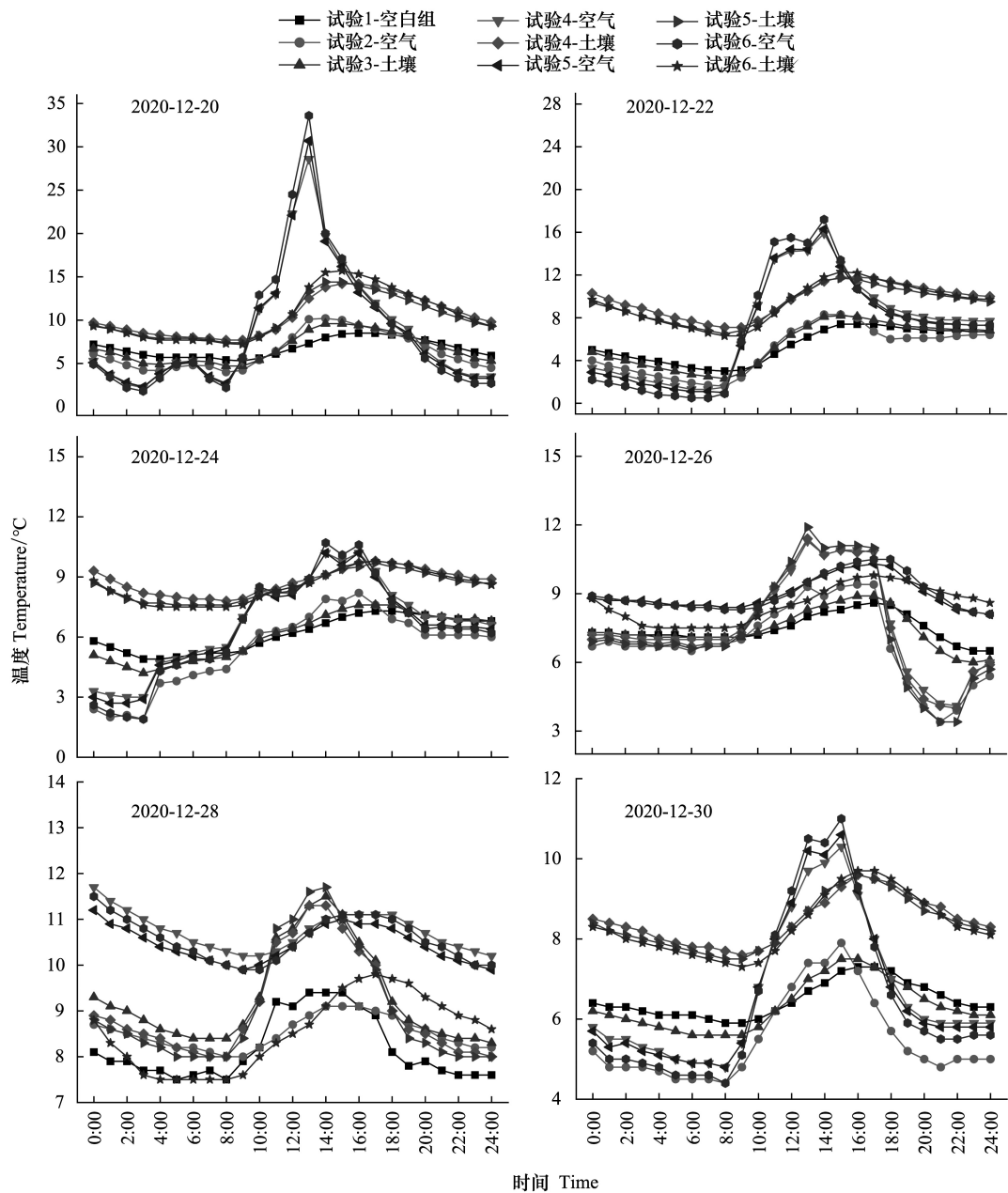


图 4 12 月 20—30 日各试验组温度变化曲线图
Fig.4 Temperature variation curves of each test group from 20 to 30 December

加有机肥和水,无温室棚;试验 2 在施加等量肥料和水的条件下,增添了适量生根剂,无温室棚;试验 3 在施加等量有机肥、水、生根剂条件下,埋设了适量稻壳,无温室棚。试验 4 施加等量有机肥、水的条件下,增设了温室棚;试验 5 在施加等量有机肥、水的条件下,增添了等量生根剂,有温室棚;试验 6 施加等量有机肥、水、生根剂的条件下,埋设了等量稻壳,有温室棚。

温室棚的存在使得土壤温度得到了有效提升,平均提高了 3.5 ℃,这对秋冬季或高海拔地区烟苗移栽具有积极作用。太阳辐射量对棚内外温度有较大影响,从图 4 中可以明显看到,各组试验温度随时间呈先增后减的趋势,在中午 12:00—14:00 达到最高温度(此时太阳辐射量较大)。除了降雨天气时外界太阳辐射量小而导致棚内外土壤温度和棚内空气温度相差较小外,其余时间棚内空气温度均大大高于土壤温度,最大温差高达 20 ℃左右。这由于稻壳堆肥产热有效地提高了温室棚内夜间温度,其主要原因为:晴天温室棚吸收太阳辐射量,且温室棚薄膜透光率较大,吸收的热量直接通过对流换热与辐射传给空气。温室棚内部土壤温度则是通过与棚内空气进行自然对流换热后再将热量通过导热的方式传导深层土壤,本试验所测土壤温度为距离垄平面 10 cm 的位置,由于土壤热导率较低,导致所测点温度也较低,同时还可以发现,土壤热容量较大,单日内的温度梯度远小于棚内空气的温度梯度。此外,利用稻壳堆肥产生的热量,可以有效提升土壤温度,但提升幅度有限,仅为平均 1.4 ℃左右。耦合稻壳堆肥和温室棚研究发现,对比空白试验组,通过稻壳堆肥酿热可使温室棚内日平均气温提高 4.2 ℃,日最低气温平均提高 4.6 ℃。温室棚内土壤温度平均提高 3.5 ℃且温室棚中土壤的平均温度低于 10 ℃的天数明显减少。在有温室棚的试验中,埋设稻壳的棚内空气温度和土壤温度均高于未埋设稻壳的温室棚,表明温室棚和稻壳堆肥耦合作用可进一步提升土壤温度。

烟苗生长高度和叶片数是直接反应烟苗生长情况的重要参数。因此,本研究分别对各试验组中烟苗茎高和叶片数进行统计(每 7 天统计一次),如图 5 所示。由于烟苗在移栽和生长过程中难以控制其茎高和叶片数统一,所以试验中采用每个试验组的平均茎高和平均叶片数作为烟苗生长的评价指标。相比于埋设稻壳的无温室棚试验组,试验 3 的烟苗茎高和叶片数量每周的增量相差较小,即无温室棚时,埋设稻壳对烟苗生长作用不明显。在 21 d 后,试验 3 的烟苗平均茎高从移栽时的 7.5 cm 增高到 10.5 cm,平均叶片数从 6 片增长到 9 片。而埋设稻壳的温室棚中烟苗茎高和叶片数增长值最大,每组平均茎高从移栽时的 7.8 cm 增长到 12 cm,平均叶片数从 5 片增长到 11 片。其原因主要是温室棚和稻壳产热耦合作用提升了土壤温度,为烟苗的生长发育提供良好的环境。

3.2 数值模型验证

数值模型的验证以 2020 年 12 月 25 日的试验数据为基准,模拟分析时也选取该日的太阳辐射量。土壤试验温度为棚地表面以下 10 cm 处的土壤层平均温度,空气试验温度为棚地表面以上 10 cm 处的空气层平均温度。模拟温度为数值模拟得到的棚内同一土壤/空气层的平均温度,试验温度和模拟温度均选取整点进行观测。如图 6 所示为棚内温度场的对比,模拟值与试验值吻合较好。温室棚内温度场的模拟值与试验值保持相同的变化趋势,土壤温度模拟值与试验值的绝对误差在 1.8 ℃以内,空气温度模拟值与试验值的绝对误差在 3.8 ℃以内。检验结果表明,模拟值与试验值之间虽然存在一定的偏差,但均在合理的误差范围内,总体吻合良好,建立的数值模型具有一定的可行性和合理性,可用于棚内温度场的模拟。

一天中,小型温室棚内土壤温度与空气温度变化趋势相同。在 9:00—16:00 时段,室内温度急剧升高并在 16:00 时左右达到峰值,在 17:00—20:00 范围内急剧降低。这是因为白天太阳辐射存在,使得温室不断吸收并积蓄热量而迅速升温,傍晚太阳辐射消失,温室与外界存在较大的温差,热量散失明显。此外,可以发现半夜到第二天凌晨(24:00—8:00),室内温度下降较为缓慢并在 8:00 时左右温度降到最低。此时段无太阳辐射,且温室与环境之间的温差较小,因此温室散失热量但不显著,表现出缓慢下降的趋势。

3.3 不同土壤层温度变化

温度对烟草生长和发育具有重要影响,适宜的土壤温度有利于烟草的正常生长并提高烟叶的品质。烟草是一种喜温作物,整个生育期要求比较高的温度。烟草生长发育最适宜的温度是 25—28 ℃,地上部在 8—

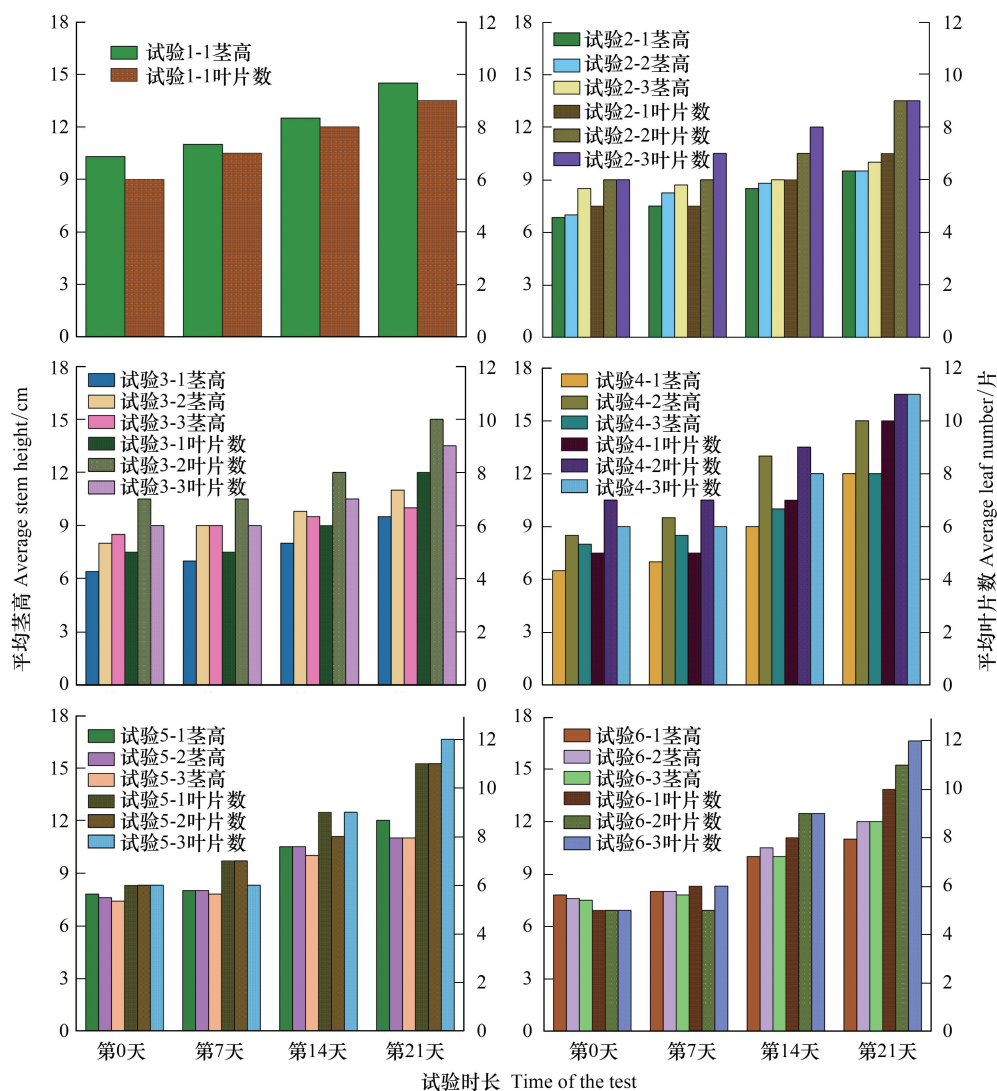


图5 各试验组烟苗平均茎高及平均叶片数统计图

Fig.5 Statistical graph of average stem height and average leaf number of tobacco leaves in each experimental group

38℃的温度范围内都能生长,地下部分在7—43℃之间都能生长^[26]。温度过低和过高都不利烟草植株的生长,在零下1—2℃的环境中烟株就会死亡^[26]。因此烟苗移栽到大田时,必须保证10 cm深的土层温度在9℃以上。一般认为,昼夜温差的存在对于烟株生长发育是有利的^[26]。烟草幼苗期根系较短,在土壤中分布范围较小,其大部分根系分布在距地表20 cm左右的土壤层。因此,本文通过分析不同深度(-3 cm、-5 cm、-7 cm、-10 cm、-15 cm、-20 cm)土壤层温度的变化情况,以探究温室棚土壤温度对烟草生长期的作用和影响。

图7为未埋设稻壳时不同深度土壤层温度日变化曲线和不同深度土壤层的平均温度变化。从图7中可以看出,不同深度的土壤层温度场变化状况是一致的,均呈现先降低后升高再降低的趋势。在凌晨(24:00—8:00)土壤温度缓慢下降;在8:00时附近温度(8.2—9.5℃)最低。在此时段没有太阳辐射,使温室棚无热量输入;且温室与环境存在对流、辐射换热,温室对外有热量损失。但因为土壤温度与周围温度之间的温差较白天来说要小很多,换热强度不大,所以土壤温度呈现出缓慢下降的情况。在9:00—16:00范围内,土壤温度急剧升高并达到峰值(9.5—18.5℃),而在一天的16:00后,土壤温度急剧降低(18.5—11.3℃)。白天,温室棚吸收并积蓄了太阳辐射的能量,其内温度均升高,且随着太阳辐射的加强,温度攀升速率更加明显;16:00后

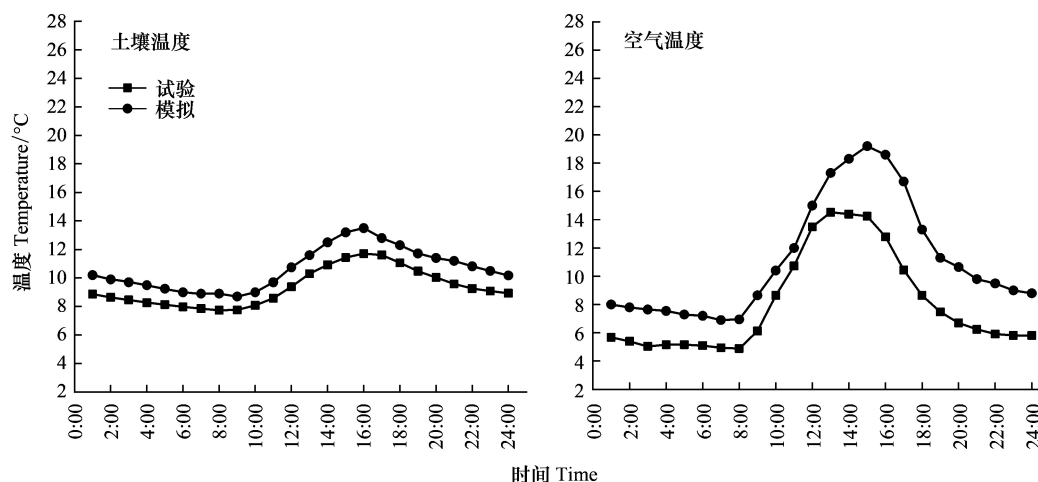


图 6 棚内土壤、空气温度场的对比

Fig.6 Comparison of soil and air temperature fields in the shed

太阳辐射强度逐渐减弱,温室棚吸收的热量逐渐减少,且此时温室棚与室外环境之间的温差较大,导致温室棚散失热量较为显著,其内温度急剧下降。随着土壤深度的增加,温度场的波动幅度和平均温度均逐渐减小,越靠近地表土壤层的日温度差越大,温度场变化也越明显^[27]。

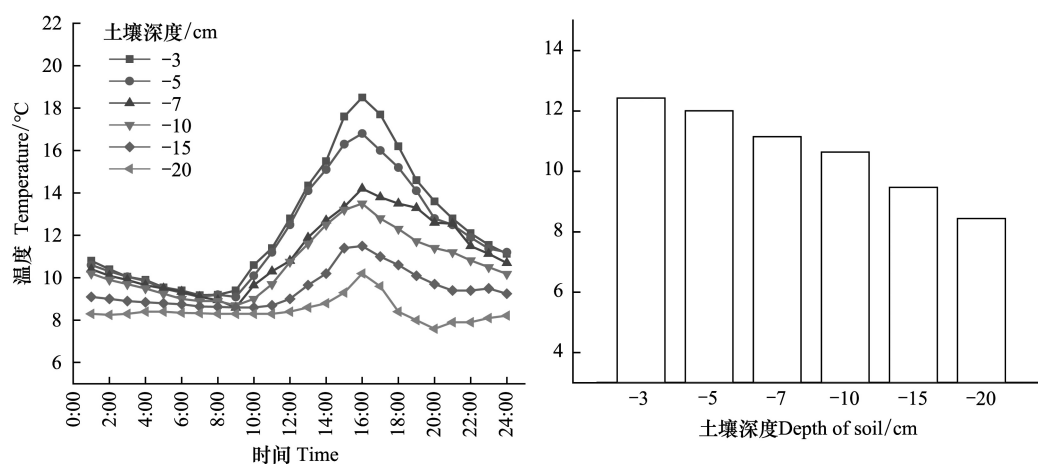


图 7 未埋设稻壳时不同土壤层温度的变化

Fig.7 Variation in temperature in different soil layers without buried rice hulls

图 8 为未埋设稻壳时温室棚截面在不同时刻的温度分布,图 9 为未埋设稻壳时不同时刻的温度场情况。从图 8 和图 9 中可看出,温室内部中心即土壤与空气接触区域的温度较高,四周温度明显低于中心温度,且土壤温度明显高于空气温度。这因为温室棚与周围环境存在着对流换热,浅层土壤向深层土壤导热,热量从温室棚向深层土壤以及周围环境进行传递,但土壤导热能力低于空气的对流换热且土壤的比热容远远高于空气的比热容,故中心土壤温度较高。对比 8:00 和 16:00 时刻的温度分布情况,可看出 16:00 时温室的整体温度明显高于 8:00 时的温度,正因白天太阳辐射的存在,使得温室温度明显升高。夜间无太阳辐射时,有较好蓄热能力的土壤可维持着温室温度。在垂直方向上,随着土壤深度的增加,温度逐渐递减,当深度达到 20 cm 时土壤的温度达到最低且全天波动幅度最小,这表明在烟草根系所处的土壤层区域可维持较好的温度,展现了温室良好的保温和蓄热能力,为烟苗在低温条件下提供了良好的生长温度,有利于烟苗越冬生长。根据温度分布变化的情况来看,夜晚土壤层温度较低而白天土壤层温度较高,使得烟草根系生长的土壤区域存在着明

显的昼夜温差,有助于提高烟叶的品质。

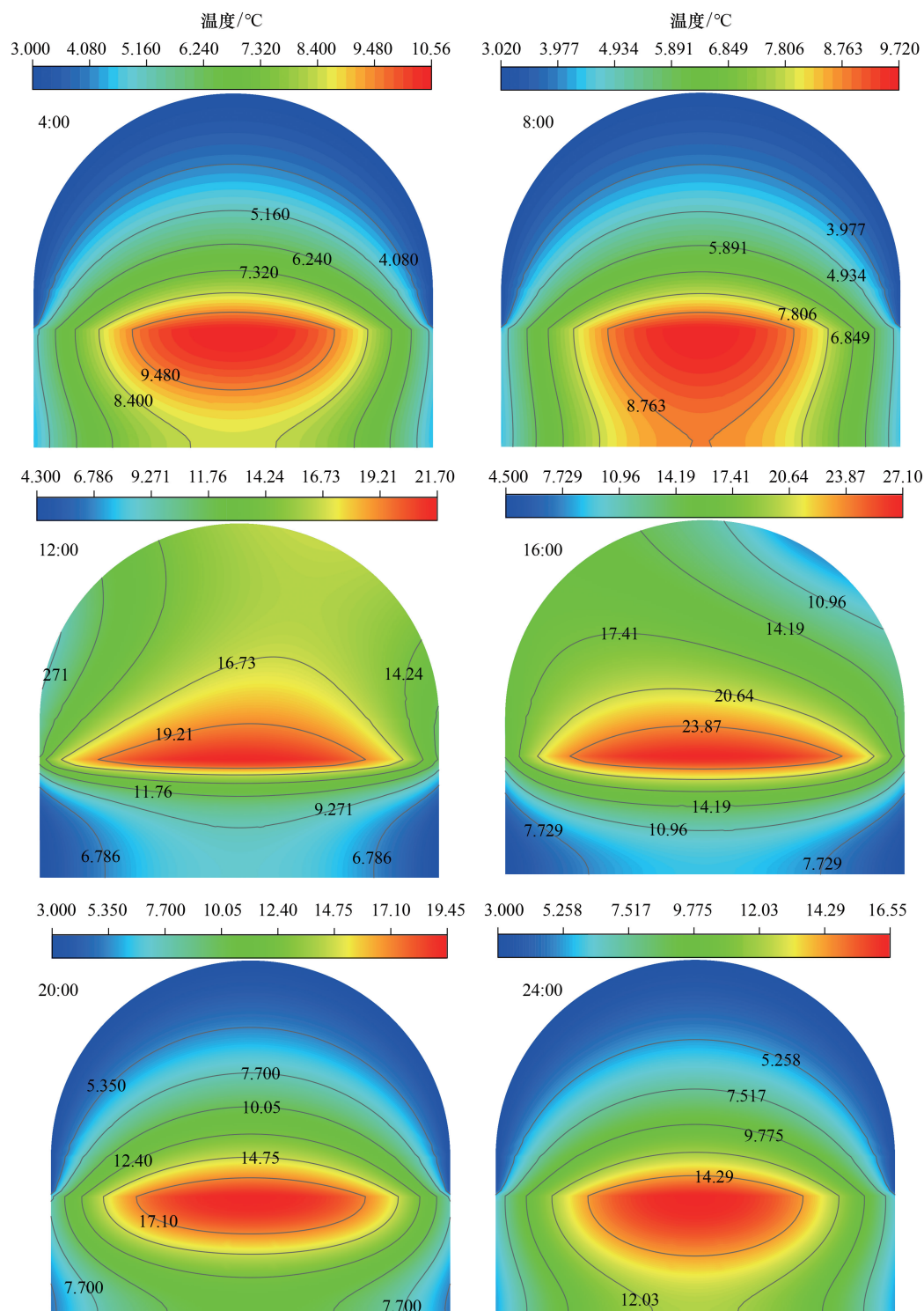


图8 未埋设稻壳时温室棚截面不同时刻的温度分布云图

Fig.8 Temperature distribution clouds at different moments in the cross-section of the greenhouse shed without buried rice hulls

定量分析来看,温室棚地表下 20 cm 左右的土壤层区域温度高于 8 °C,10 cm 以上的土壤层温度均高于 10.6 °C,温室棚内土壤层温度最高可达 18.5 °C。温室棚土壤温度均处于适宜烟苗生长的温度范围内,棚内移栽的烟草幼苗可正常生长并不存在抑制作用。在 8:00—16:00 时段土壤温度急剧上升,更有利于烟草幼苗的

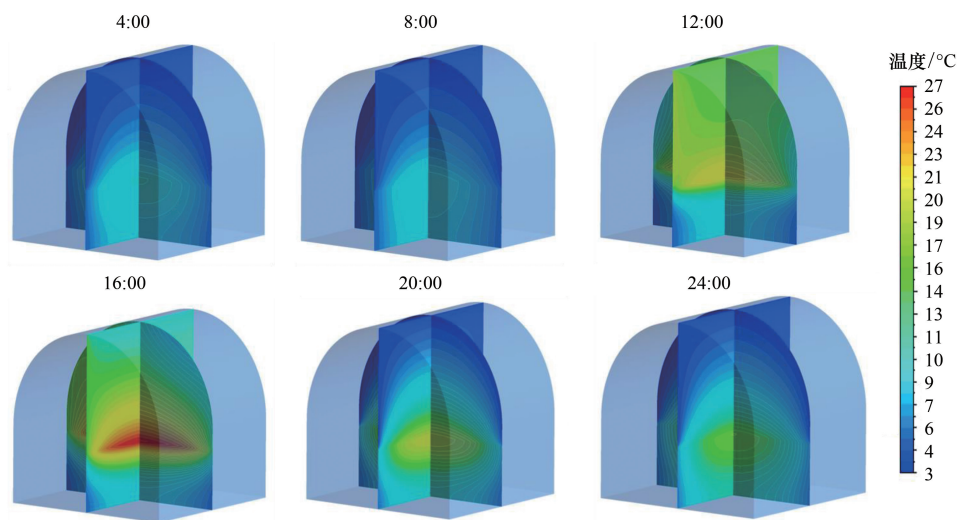


图9 未埋设稻壳时不同时刻温度分布云图

Fig.9 Cloud map of temperature distribution at different moments without buried rice hulls

生长。不同深度的土壤层昼夜温差区别明显,靠近地表的土壤昼夜温差最大,随土壤深度增加逐渐减小。深度在 10 cm 以上的土壤层存在明显的昼夜温差(2—9 °C),这有利于烟苗生长。

3.4 埋设稻壳对土壤温度场的影响

烟草是喜温植物,其生长要求最低温度是 10—13 °C,温度逐渐上升,生长加快,所以必须保证土壤 10 cm 深处的土温稳定在 10 °C 以上(最好在 13 °C 以上)并逐渐有上升的趋势时进行移栽,才有利于烟苗生长^[28]。提高烟草生长的土壤温度能激发土壤微生物大量繁殖及土壤中氮、碳、磷等循环有关的一些酶类的活性明显提高,从而促进了土壤中营养物质的循环,使土壤肥力得到补充和提高,对促进烟草正常生长、实现烟草反季节栽培及其高海拔寒冷地区的种植具有重要意义^[29]。埋设稻壳发酵产热是提升土壤温度的一种简洁有效的方法,且稻壳发酵具有成本低、可再生、节约资源、对环境无污染等优点^[30—32]。因此,通过对比埋设稻壳与未埋设稻壳时不同深度(-3 cm、-5 cm、-7 cm、-10 cm)土壤层温度,可以探究埋设稻壳对烟草生长期土壤温度场的影响和作用。

稻壳埋设深度为 12—18 cm,故对地表以下 10 cm 区域的土壤层温度及其平均温度进行分析。从图 10 可看出,各个土壤层温度变化趋势相同,且与未埋设稻壳时一致,温度呈现出先降低后升高再降低的趋势。不

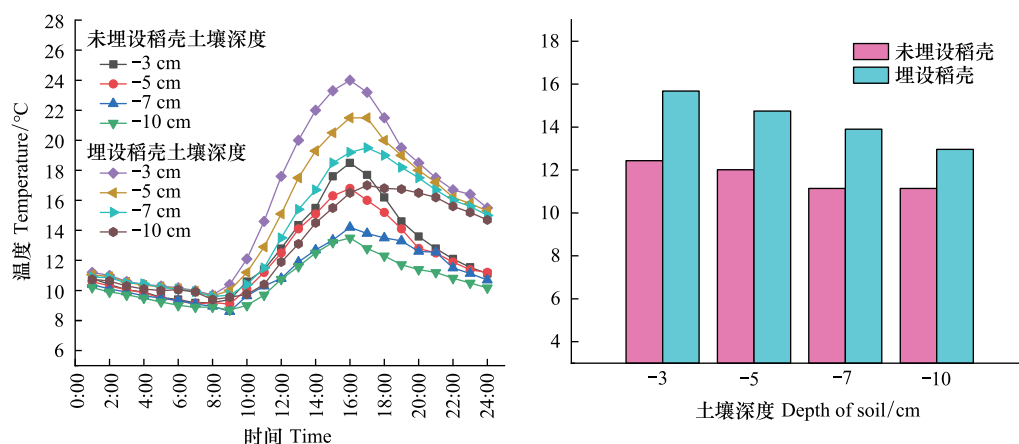


图10 埋设稻壳时不同土壤层的温度变化及温差对比

Fig.10 Comparison of temperature changes and temperature differences between different soil layers with buried rice hulls

同深度的地温随土壤深度的增加均呈现出下降的趋势,从下降的幅度上看,未埋设稻壳的温室地温下降得略大一些。这是由于白天土壤通过吸收太阳辐射出的大量热量,一部分反射到空气中,另一部分则储存在土壤中,储存在土壤中的热量在夜晚起到保温的作用。而深层土壤受到太阳辐射的影响较小,储存的热量也相对较少,所以地温会随着土壤深度的增加而减小。埋设稻壳的温室在同一时刻均比未埋设稻壳的地温高,在距垄台表面越近地温升高幅度越大。从图 10 可看出,越接近地表,两者的温差就越大。这是因为埋设的稻壳起到了保温和热量补给的作用。为证明埋设的稻壳的作用,研究对温室内环境的温度分布云图进行了分析。

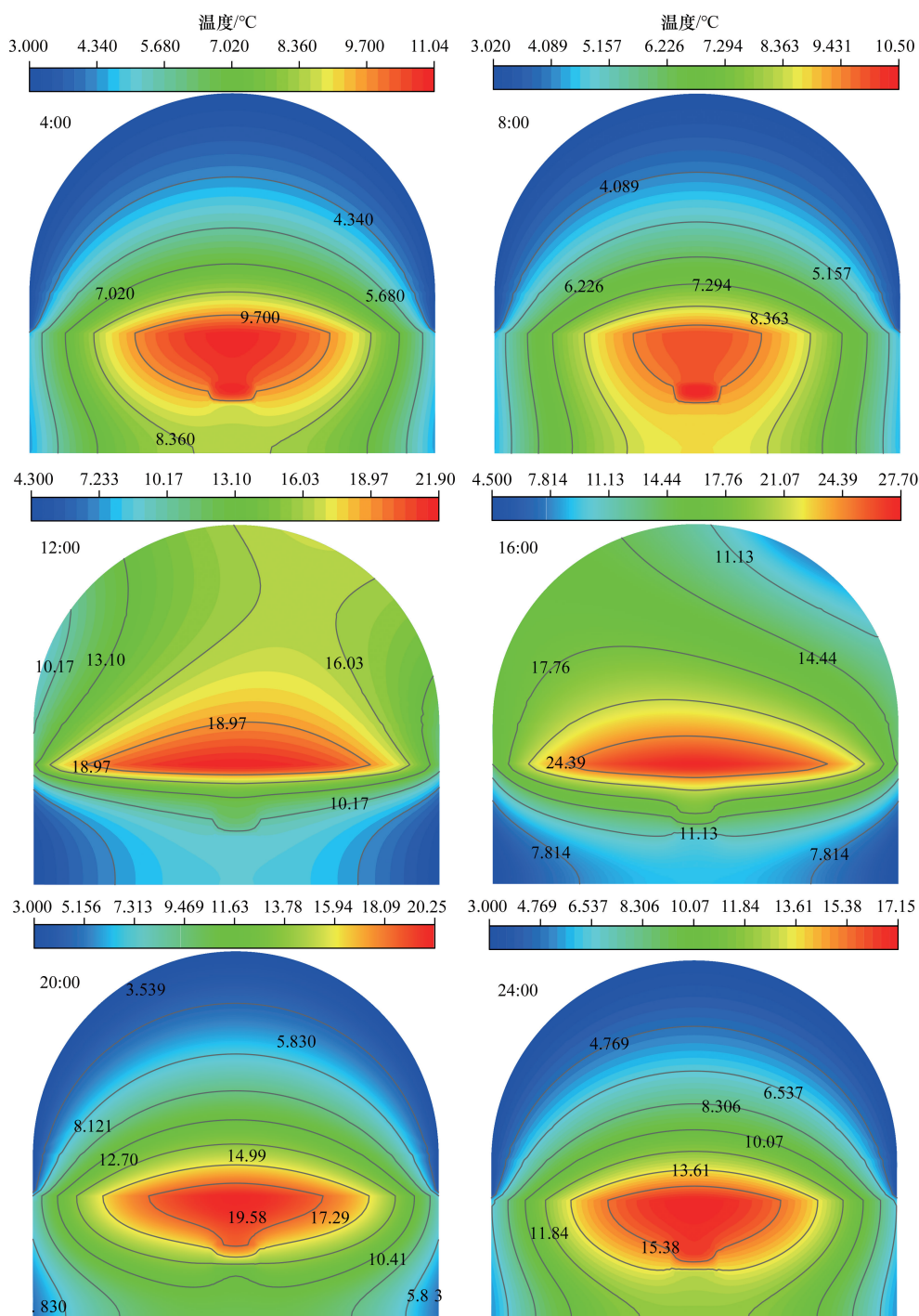


图 11 埋设稻壳时温室棚截面不同时刻的温度分布云图

Fig.11 Cloud plot of temperature distribution at different moments in the cross-section of the greenhouse shed with buried rice hulls

图 11 为埋设稻壳时温室棚截面不同时刻的温度分布,图 12 为埋设稻壳时不同时刻温度分布云图。从图 11 和图 12 中可看出,温室内温度分布与未埋设稻壳时的温度分布有些相似之处,温室内部中心区域温度较高,而周围边界处存在热量散失使其温度较低。但是,埋设稻壳的温室中稻壳发酵产热使得稻壳埋设局部区域的土壤温度明显偏高,较高温度的等温线下移使得大部分土壤区域都处于较高的温度范围,这也正是烟苗根系所在区域。这充分证明,埋设的稻壳起到了保温和热量补给的作用。在白天,温室吸收了太阳辐射的能量,同时稻壳发酵产热也为温室提供能量,使得埋设稻壳的温室整体温度高于未埋设稻壳的温室。夜晚,不存在太阳辐射的情况下,稻壳提供的热量补给使得夜间土壤维持在较高的温度,并且同样在烟草根系生长的土壤区域存在着明显的昼夜温差,有助于烟苗在低温环境下生长、提高烟叶的品质。

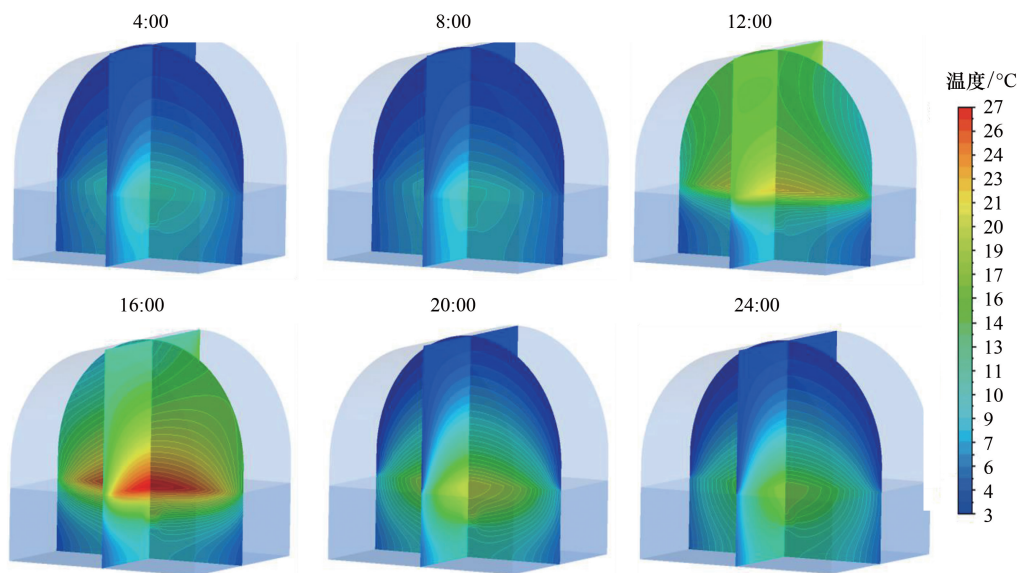


图 12 埋设稻壳时不同时刻温度分布云图

Fig.12 Cloud map of temperature distribution at different moments with buried rice hulls

从图 11、图 12 可看出,12:00—16:00 时段在一天中太阳辐射最强,埋设稻壳的温室地温随土壤深度的变化速率与未埋设稻壳的略有不同,埋设稻壳的温室土温在该时段上升速度明显提高。定量的分析看,埋设稻壳的温室与未埋设稻壳的相比,其土壤温度提高了 0.5—6.5 °C,深度 10 cm 范围内的土壤层最低温度提高了 1.1 °C,最高温度提高了 5.5 °C。同时,土壤层温度的昼夜温差提高了 4.8—5 °C,各土壤层平均温度提高了 2.3 °C 以上。这表明,埋设稻壳可以提高和维持温室内土壤温度,对土壤温度具有调节作用。埋设稻壳提高了土壤温度,提高了棚内土壤的昼夜温差,有利于促进烟草正常生长、实现烟草反季节栽培及其高海拔寒冷地区的种植。

4 结论

本文通过试验和数值模拟的方法,研究了移栽烟苗的温室棚内温度场变化规律。建立了生物质发酵增温型温室棚的试验组及其三维非稳态数值模型,对棚内土壤及空气温度场进行了试验数据分析和数值模拟,同时根据试验数据验证了数值模型的准确性,并探究了埋设稻壳与否对温室棚不同深度土壤层温度的影响,得到相关结论如下:

(1) 试验组中埋设稻壳的温室棚内土壤温度平均提高 3.5 °C,且温室棚中平均温度低于 10 °C 的天数明显减少。埋设稻壳的温室棚中烟苗茎高和叶片数增长值最大,平均茎高从移栽时的 7.8 cm 增长到了 12 cm,叶片数从平均 5 片增长到了 11 片,均大于未埋设稻壳试验组。

(2) 利用 CFD 方法得到的温度模拟值与试验值保持相同的变化趋势,土壤温度的绝对误差在 1.8 °C 以内,空气温度的绝对误差在 3.8 °C 以内。模拟结果与试验结果吻合良好。

(3)数值模拟表明温室棚内不同深度的土壤层温度变化情况一致,均呈现先降低后升高再降低的趋势。不同深度的地温随土壤深度的增加均呈现出下降的趋势。地表下 20 cm 左右的土壤层区域温度均高于 8 ℃, 10 cm 以上的土壤层温度均高于 10.6 ℃。温室棚土壤温度均处于合适烟苗生长的温度范围内,且土壤温度存在一定的昼夜温差,有利于烟苗正常生长。

(4)数值模拟中埋设稻壳的温室土壤层温度变化情况与未埋设稻壳的温室一致。但其土壤层平均温度、最低温度至最高温度以及昼夜温差较未埋设稻壳相比,分别提升了 2.3 ℃、1.1—5.5 ℃、4.8 ℃。埋设稻壳可以提高和维持温室内土壤温度,对土壤具有保温和热量补给的作用。

参考文献(References):

- [1] 武莹, 李建明, 肖金鑫, 庄媛, 廖明韬. 新型大跨度非对称塑料大棚内冬季温光变化特征研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(06): 97-106.
- [2] 申卫收, 林先贵, 张华勇, 尹睿, 段增强, 施卫明. 不同施肥处理下蔬菜塑料大棚土壤微生物活性及功能多样性. 生态学报, 2008, 28(06): 2682-2689.
- [3] 朱隆静, 王克磊, 陈先知, 苏世闻, 徐坚. 浙南单体塑料大棚内冬季温光性能特征研究. 农学学报, 2020, 10(06): 81-85.
- [4] Chen S Q, Zhu Y P, Chen Y, Liu W. Usage strategy of phase change materials in plastic greenhouses, in hot summer and cold winter climate. Applied Energy, 2020, 277: 115416.
- [5] 朱宝文, 胡德奎, 郭晓宁, 何永晴. 高寒地区日光温室地温变化及预报. 干旱气象, 2014, 32(05): 765-772.
- [6] 闫云飞, 张承华, 高伟, 申开明, 李建波, 李钠钾, 江厚龙, 汪代斌. 日光温室对重庆地区春冬季烟苗生长温度调控的数值研究. 农业与技术, 2021, 41(11): 85-91.
- [7] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响. 生态学报, 2011, 31(05): 1295-1302.
- [8] 闫晓俊, 钟波元, 陈廷廷, 张礼宏, 宋涛涛, 陈光水. 大气和土壤增温对杉木幼苗叶片功能性状的影响. 生态学报, 2019, 39(15): 5653-5661.
- [9] 张国栋, 展星, 李园园, 沈向, 陈学森, 吴树敬, 毛志泉. 有机物料发酵流体和堆肥对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生物量的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3663-3673.
- [10] 战丽媛. 深埋秸秆温室番茄地温数值模拟及其应用[D]. 辽宁: 沈阳农业大学, 2019.
- [11] 宋时丽, 吴昊, 黄鹏伟, 孙凯, 张振华, 张勇, 戴传超. 秸秆还田土壤改良培肥基质和复合菌剂配施对土壤生态的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4562-4576.
- [12] 于涛, 王冬菊, 王英华. 寒冷地区日光温室水平地埋管蓄热效果研究. 农机化研究, 2022, 44(03): 248-258.
- [13] 肖金鑫, 李建明, 武莹. 大跨度非对称酿热温室热环境及节地增产效果分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(01): 65-76.
- [14] 孔政. 农业废弃物发酵对温室环境影响的研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2016.
- [15] Poblete R, Salihoglu G, Salihoglu N K. Incorporation of solar-heated aeration and greenhouse in grass composting. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(21): 26807-26818.
- [16] Neugebauer M, Halacz J, Olkowski T. A compost heating solution for a greenhouse in north-eastern Poland in fall. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123613.
- [17] 张艳, 杜震宇. 日光温室浅层土壤湿度场的数值模拟. 太原理工大学学报, 2020, 51(02): 284-290.
- [18] Zhang G S, Ding X M, Li T H, Pu W Y, Lou W, Hou J L. Dynamic energy balance model of a glass greenhouse: An experimental validation and solar energy analysis. Energy, 2020, 198: 117281.
- [19] Taki M, Ajabshirchi Y, Ranjbar S F, Rohani A, Matloobi M. Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. Information Processing in Agriculture, 2016, 3(03): 157-174.
- [20] Zhang X, Wang H L, Zou Z R, Wang S J. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese Solar Greenhouse temperature distribution. Biosystems Engineering, 2016, 142: 12-26.
- [21] Wang X W, Luo J Y, Li X P. CFD Based Study of Heterogeneous Microclimate in a Typical Chinese Greenhouse in Central China. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 13(05): 914-923.
- [22] 曹雯. 秋冬季南方单栋塑料温室小气候分析与温湿环境模拟研究[D]. 江苏: 南京信息工程大学, 2012.
- [23] Zhang G P, Shi Y L, Liu H, Fei Z Y, Liu X, Wei M, Liu F S, Wang S J. Heat transfer performance of an assembled multilayer wall in a Chinese solar greenhouse considering humidity. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102046.
- [24] 王爽. 稻壳与地质聚合物复合制备建筑保温材料实验研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2018.
- [25] 方慧, 杨其长, 张义, 程瑞峰, 张芳, 卢威, 刘焕. 基于 CFD 的不同走向大跨度保温型温室温度场模拟. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 133-139.
- [26] 河南省农林科学院烟草研究所. 烟草. 河南: 河南科学技术出版社, 1983: 44-45.
- [27] 崔爱花, 杜传莉, 黄国勤, 王淑彬, 赵其国. 秸秆覆盖量对红壤旱地棉花生长及土壤温度的影响. 生态学报, 2018, 38(02): 733-740.
- [28] 唐世凯. 烟草生境. 云南: 云南科技出版社, 2011: 40-41.
- [29] 邱尧, 周冀衡, 黄勤理, 李强, 张毅, 刘晓颖. 根区温度与氮素形态互作对烟株生物量和烟碱积累的影响. 烟草科技, 2015, 48(03): 19-22.
- [30] 赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智. 磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2481-2488.
- [31] 徐经年, 祖朝龙, 郭卢, 王天才, 宋军, 张林, 刘碧荣. 以发酵稻壳为主要原料的烤烟漂浮育苗基质替代性研究. 种子, 2013, 32(08): 100-102.
- [32] 谭茜, 平原野, 曾文龙, 熊德中, 蔡海洋. 育苗基质对烟苗生长发育的影响. 亚热带农业研究, 2019, 15(01): 27-34.