

青藏高原生态大棚温度环境的仿真研究^{*}

姜云超, 王三反

(兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

[摘 要] 为给青藏高原生态大棚的建设提供科学依据和技术参考, 运用 ANSYS 有限元分析软件对青藏高原生态大棚内的空间温度场进行数值仿真, 并研究了棚内影响污水处理和蔬菜生长的区域内的温度变化规律。模拟结果表明, 在冬季有可能出现的最不利条件下, 由于高原的强辐射和大棚特殊的保温效果, 晴天该区域内的温度仍能维持在 13~ 22 , 阴天温度可维持在 10~ 18 , 生态大棚内的温度条件完全能够满足污水处理和蔬菜种植的基本需求。

[关键词] 青藏高原; 生态大棚; 空间温度场; 数值仿真

[中图分类号] S626 5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)05-0092-05

随着我国交通事业的蓬勃发展和人民物质生活水平的不断提高, 青藏铁路工程建设正在紧锣密鼓地进行着。为了改善海拔 4 500 m 以上永久冻土区内铁路沿线站区职工的生活状况, 并实现对生活污水的有效处理, 本研究采用的污水处理回用生态大棚技术将二者有机地结合在一起, 青藏高原充足的太阳辐射资源为大棚内作物的生长和污水处理设备的正常运行提供了能量。在生态大棚中, 生活污水可以得到有效处理, 通过滴灌、渗滤回收技术还可回用于种植及生活冲厕, 而且大棚内适宜的温度以及因光合作用而产生的充足氧气, 还可以使污水处理中好氧生物的作用得到良好发挥。这种集环保、生物及工程技术为一体的生态大棚, 可使高原站区的废水处理及蔬菜种植两个难题同时得到解决, 对保护环境及改善高寒、高海拔地区铁路职工的生活条件十分有利。

高原地区寒季长、温差大, 自然环境恶劣, 如何保证寒季大棚内适宜的温度环境是其关键问题。在我国北方黑龙江、新疆一带的严寒地区, 虽已有大棚种植的一些成功范例, 但在青藏高原, 类似的大棚建筑目前国内外尚无成熟的经验可以借鉴。因此, 为了保证生态大棚在冬季能够正常运行, 前期的模拟是十分必要的, 现在所能采用的最有效的方法是数值模拟技术计算机仿真, 其中以有限元法最为普遍^[1]。ANSYS 软件是基于有限元方法解决温度场、应力场、流场等工程问题的著名高级工程模拟软件, 在土

木工程、能源、地矿、水利、铁道、生物医学、电子等领域有着成功而广泛的应用^[1]。本研究首次应用 ANSYS 有限元分析软件, 对设置在青藏铁路望昆站的生态大棚冬季状态进行了数值仿真模拟, 以期生态大棚的建设提供科学依据和技术参考。

1 模拟分析要点与理论计算方法

青藏铁路望昆站区位于昆仑山北坡永久冻土区内, 海拔 4 516 m, 年平均气温 - 6.7 , 最大风速 24 m/s, 主导风向西风; 冬季月平均日照百分率 73%。年内太阳辐射最小值出现在 12 月, 月平均日总辐射量为 10.22 MJ/(m² · d) (1994~ 1995 年)^[2]。

1.1 模拟分析要点

模拟计算冬季太阳辐射对大棚内温度的影响, 特别是在阴天情况下, 太阳辐射能否满足蔬菜生长和污水处理所要求的基本条件。给出大棚外瞬时变化的气候条件及射进室内的太阳直接辐射在地面、后墙面、后屋面上的瞬时分布值。

1.2 生态大棚的建设

试验所采用的生态大棚架为钢结构, 坐北朝南, 占地 200 m²。为了增加外围结构保温能力, 提高热能利用率, 采用复合保温墙体, 即加气混凝土墙内侧贴有阻燃性发泡聚苯板。有研究^[3]表明, 室内气温主

^{*} [收稿日期] 2003-09-15

[基金项目] 铁道部科技攻关项目(2002Z005)

[作者简介] 姜云超(1978-), 女, 甘肃嘉峪关人, 在读硕士, 主要从事污水处理研究。

要受太阳辐射的影响, 而室外气温只具有次要作用, 因此温室后墙对保证温室热环境具有重要作用。据此在试验大棚北墙内侧设置了封闭式水幕墙(尺寸为 $20\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 0.08\text{ m}$), 利用水比热大、蓄热能力强的性质, 白天吸收太阳辐射热, 日落后将蓄集的热量放出, 以减缓棚内空气的降温速度, 保证作物正常的生长发育。为了提高大棚内的温度, 棚面采用的是新型的 EVA (乙烯-乙酸乙烯酯共聚物) 双层膜, 两层膜之间有 11 mm 厚的空气夹层, 可起到保温作

用; 日落以后及阴雨天, 棚面用镀铝膜+ 发泡聚乙烯组成的复合材料做成的机械卷帘覆盖(保温帘尺寸为 $20\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 0.025\text{ m}$), 其传热系数比无铝膜蜂窝结构覆盖层低 $35\% \sim 70\%$ [4]。因望昆站位于永久冻土区内, 年平均地温 -0.5°C , 为防止地下永久冻土层的融化而导致土壤种植层温度降低, 在种植层下铺设聚苯板保温层以及防水层。大棚基本尺寸如图 1 所示。

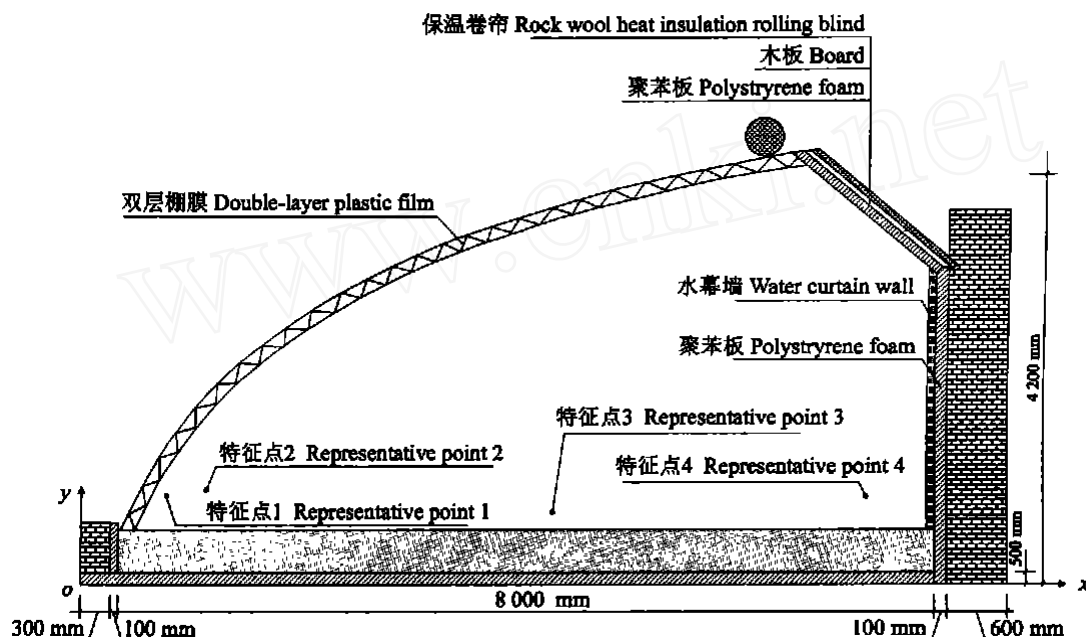


图1 大棚结构图

加气混凝土墙体; 种植土; 聚苯板; 水幕墙; 保温卷帘; 木板

Fig.1 Structure of the ecological greenhouse

Aerated concrete wall; Soil; Polystyrene foam; Water curtain wall; Rock wool heat insulation rolling blind; Board

1.3 计算采光量

对给定的任意时刻, 由于采光曲面沿大棚跨度方向每个点上的太阳入射角不同, 所以在各点上的太阳辐射透过率也不同, 因此为便于计算, 将曲面分割成小折面, 把曲面问题转化成平面问题。小平面数按棚面骨架网格数来取。由图 2 知, 共有 8 个折面, 任取第 i 个小折面讨论任意时刻透过其进入大棚的太阳辐射值, 可用下式计算 [5]:

$$J_{hi(t)} = J_{n(t)} \cdot \sinh(t) \cdot R_{i(t)}$$

$$J_{zi(t)} = J_{n(t)} \cdot \cosh(t) \cdot \cos(A(t) - Ah) \cdot R_{i(t)}$$

$$J_{zhi(t)} = J_{n(t)} \cdot R_{i(t)} \cdot \sinh(t)$$

$$J_{p(t)} = 0.102 J_{n(t)}$$

式中, $J_{hi(t)}$, $J_{zi(t)}$, $J_{zhi(t)}$ 分别为 t 时刻透过第 i 个进光面到达大棚地面、后墙面和后屋面上的辐射强度; $J_{n(t)}$ 为 t 时刻与辐射方向垂直的平面上的辐射强度; $J_{p(t)}$ 为 t 时刻棚面所吸收的太阳辐射强度值, 0.102 为棚膜对太阳辐射的吸收系数 [6]; $R_{i(t)}$ 为 t 时刻第 i 个进光面的辐射透过率; $A(t)$, Ah 分别为 t 时刻的太阳方位角和大棚的方位角; $h(t)$ 为 t 时刻太阳高度角; $h(t)$ 为后屋面内侧与太阳光线的夹角:

$$\sinh(t)=\cos h(t)\cdot\sin\beta\cdot\cos(A(t)-Ah)-\sinh(t)\cdot\cos\beta$$

式中, β 为后屋面倾斜角。应用上述公式分别计算出 8 个小折面的 $J_{hi(t)}$, $J_{zi(t)}$, $J_{zhi(t)}$ 值, 为提高计算机的计算效率, 分别取其平均值作为模拟计算的参数。

$$J_{h(t)}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^8J_{hi(t)}, J_{z(t)}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^8J_{zi(t)},$$
$$J_{zh(t)}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^8J_{zhi(t)}$$

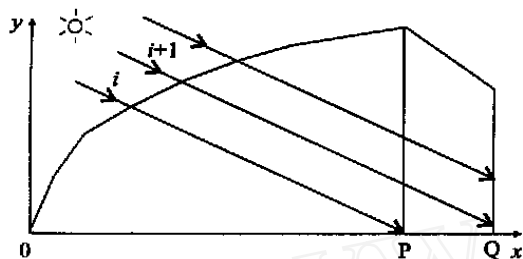


图 2 大棚小折面采光示意图
Fig. 2 Diagram of light transmission
for each small plane

2 ANSYS 软件模拟过程

2.1 施加载荷及求解

以室内空气为研究对象, 其主要与地面、后屋面、墙体和透光覆盖面之间进行着对流换热, 其自身的温度随着能量的转移而变化。为简化计算, 假定棚

内空气流动为不可压缩流体稳定流动^[7]。计算时考虑了对流、传导、辐射对棚内温度的影响。为了能够定量地了解棚内温度的变化规律, 笔者针对望昆地区不同的气候条件进行了多次模拟与探讨, 并在兰州市安宁区做了 50 m² 生态大棚的线下中试, 证明了这种模拟方法的可靠性。在此仅对望昆具有代表性的最不利天气条件下的模拟结果进行讨论。从当地 1990~ 2000 年的气象数据中筛选出了 1994-12-22(阴天) 和 1996-12-22(晴天) 的太阳辐射值, 即表 1 中的 $J_{n(t)}$, 以及历年来出现的最低温度值和最大风速值(表 2) 进行模拟, 以考察该生态大棚在严寒条件下能否满足污水处理和蔬菜生长的需要。模拟计算时所需的其他参数如下: 大棚内外空气物性参数 $\rho_0=1.332\text{ kg/m}^3$, $c_0=1.015\text{ kJ/(kg}\cdot\text{)}$, $\rho_a=1.453\text{ kg/m}^3$, $c_a=1.013\text{ kJ/(kg}\cdot\text{)}$; 大棚内土壤含水率 $E=26\%$; 空气平均相对湿度 $\Phi=87\%$ 。各种建筑材料的导热系数:

EVA 棚膜 $\lambda=0.25\text{ W/(m}\cdot\text{)}$ ^[8];
保温卷帘 $\lambda=0.036\text{ W/(m}\cdot\text{)}$ ^[9];
阻燃性发泡聚苯板 $\lambda=0.031\text{ W/(m}\cdot\text{)}$ ^[9];
加气混凝土 $\lambda=0.22\text{ W/(m}\cdot\text{)}$ ^[10]。

根据这些参数以及表 1 和表 2 提供的数据, ANSYS 软件可以自动计算结果并用曲线图的形式表现出来, 模拟结果见图 3 和图 4。

表 1 晴天、阴天时生态大棚内外的辐射状况 W/m²

Table 1 Solar radiation inside and outside the ecological greenhouse in sunny day and cloudy day respectively

日期 Date	时间 Time	$J_{n(t)}$	$J_{h(t)}$	$J_{z(t)}$	$J_{zh(t)}$	$J_p(t)$
1994-12-22 阴天 Cloudy	8: 30	59	8	22	9	6
	9: 00	82	14	41	13	8
	10: 00	90	33	62	15	9
	11: 00	166	74	124	24	16
	12: 00	170	77	126	22	17
	13: 00	166	74	124	24	16
	14: 00	114	42	78	19	11
	15: 00	82	14	41	13	8
1996-12-22 晴天 Sundy	16: 00	38	3	10	5	4
	8: 30	177	23	67	26	18
	9: 00	246	52	124	40	25
	10: 00	271	99	188	45	27
	11: 00	499	221	374	72	50
	12: 00	511	233	379	66	51
	13: 00	499	221	374	72	50
	14: 00	341	125	236	57	34
	15: 00	246	52	124	40	25
	16: 00	114	7	30	14	11

注: 表中时间为当地时间, 下表同; $J_{n(t)}$ 为实测值。
Note: Time is local time, the following table is the same; $J_{n(t)}$ is real value

表 2 冬至日室外设计计算温度、风速

Table 2 Temperature and wind speed outside the ecological greenhouse of designing calculation on Winter Solstice					
时间 Time	温度/ Temperature	风速/(m · s ⁻¹) Wind speed	时间 Time	温度/ Temperature	风速/(m · s ⁻¹) Wind speed
8: 30	- 33. 6	2. 0	20: 00	- 27. 4	3. 6
9: 00	- 31. 9	2. 6	21: 00	- 28. 2	2. 1
10: 00	- 30. 4	1. 8	22: 00	- 29. 3	5. 5
11: 00	- 28. 9	2. 3	23: 00	- 30. 6	4. 2
12: 00	- 27. 4	1. 5	24: 00	- 31. 9	6. 2
13: 00	- 25. 7	3. 2	1: 00	- 33. 3	10. 7
14: 00	- 24. 1	5. 1	2: 00	- 34. 7	15. 6
15: 00	- 24. 2	4. 2	3: 00	- 35. 8	24. 0
16: 00	- 24. 7	7. 7	4: 00	- 36. 3	12. 4
17: 00	- 25. 3	13. 6	5: 00	- 36. 6	6. 5
18: 00	- 26. 1	18. 7	6: 00	- 36. 4	3. 7
19: 00	- 26. 7	9. 2	7: 00	- 34. 9	2. 5

注: 温度和风速均为实测值。
Note: Temperature and wind speed are real value.

2.2 模拟结果

在棚内选取 4 个有代表意义的特征点, 其中点 1 为棚南侧底脚的代表点, 点 2, 3, 4 为影响污水处理和蔬菜生长的主要区域内的代表点, 点 2, 4 分别代表棚内蔬菜种植的前后边界点, 点 3 为棚内水处理设备的摆放点。这 4 个点的坐标分别是: 1(870, 900), 2(1 280, 940), 3(4 880, 700), 4(8 080, 810), 原点坐标如图 1 所示。对求解结果进行后处理分别得到了模拟日是晴天或阴天 2 种不同情况下, 这 4 个点温度随时间变化的曲线图。

2.2.1 模拟日为晴天 取 1996-12-22 冬至日的太

阳辐射值和表 2 中的温度、风速值来进行模拟, 结果如图 3 所示。早上 8:30 卷起保温卷帘, 棚膜透进太阳光, 棚内温度开始上升, 至 16:00 时各点温度均已上升至 18℃ 以上。此时棚外温度开始下降, 放下保温卷帘, 由于水幕墙以及土壤开始释放蓄集的太阳辐射热, 棚内温度仍在上升, 20:00 时特征点 2 的温度已上升至 22.1℃, 此时棚外温度为 -27.4℃, 棚内外温差达到了 49.5℃。高原的强辐射和大棚特殊的保温效果保证了棚内外的较高温差。由图 3 可以看出, 晴天棚内影响污水处理和蔬菜生长的主要区域内的温度基本可维持在 13~22℃。

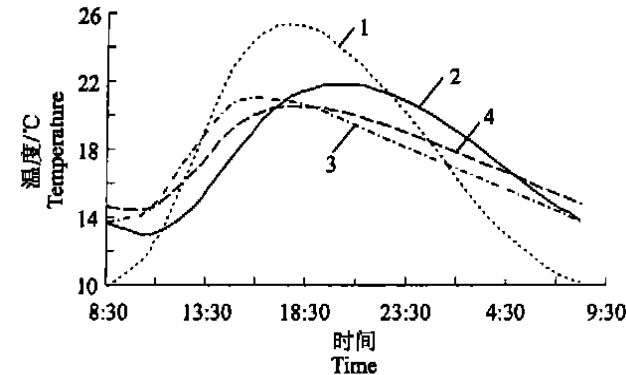


图 3 1996-12-22 8:30 到 12-23 8:30 特征点 1, 2, 3, 4 的模拟温度变化

Fig. 3 Simulating the variable curve of representative points 1, 2, 3, 4 from 8:30 Dec 22 to 8:30 Dec 23, 1996

2.2.2 模拟日为阴天 取 1994-12-22 日冬至日的太阳辐射值和表 2 中的温度、风速值来进行模拟, 结果如图 4 所示。阴天太阳辐射较弱, 棚内空气温度上升缓慢, 19:00 特征点 2 的温度由 8:30 的 13.6℃ 上升至最大值 18.5℃, 此时棚外温度为 -26.7℃, 棚内外温差达到了 45.2℃, 增温效果没有晴天时显著。21:00 以后 4 个点都开始降温, 至 23 日早

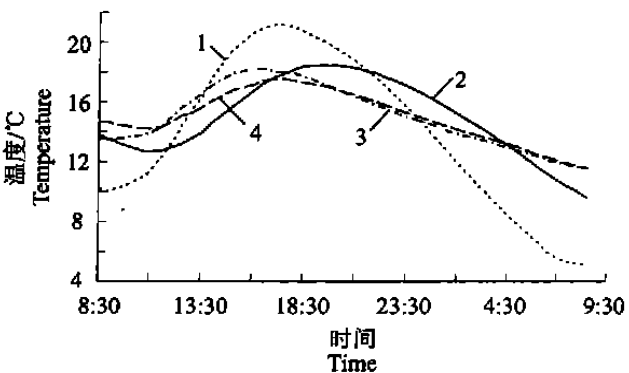


图 4 1994-12-22 8:30 到 12-23 8:30 特征点 1, 2, 3, 4 的模拟温度变化

Fig. 4 Simulating the variable curve of representative points 1, 2, 3, 4 from 8:30 Dec 22 to 8:30 Dec 23, 1994

晨 8:30 时点 1 温度已降至最低 5.5℃, 但影响污水处理和蔬菜生长的主要区域内的 3 个点, 其温度全天基本可维持在 10~18℃。

3 结 论

1) 结合青藏高原独特的地理条件和资源优势, 充分利用太阳能这一洁净能源作为生态大棚的热

源,对于节能和环保都具有十分重要的意义。

2) 比较图 3,图 4 和表 2 可知,在冬季最不利日,棚内外温差甚大,基本上在 40~49℃,而且晴天差异大于阴天。这说明生态大棚增温效果显著,且晴天比阴天效果好,同时也证明试验所采用的大棚结构可以有效地防止热量的散失,达到节能、保温、增温的目的。

3) 叶菜类作物生长发育的适宜温度白天为 15~20℃,夜间为 5~8℃^[11],生物法处理污水的温度以不低于 10℃为宜^[12]。模拟结果表明,在冬季有可能出现的最不利条件下(太阳辐射值最小、时间最

短,温度最低,风速最大),由于高原的强辐射和大棚特殊的保温效果,棚内影响污水处理和蔬菜生长的主要区域内的温度,晴天仍能维持在 13~22℃,阴天可维持在 10~18℃,表明冬季时生态大棚内的温度条件完全能够满足处理生活污水和种植蔬菜的基本要求。棚南侧底脚处热量散失最多,阴天温度会降至 5℃左右,可采取一定措施,如在此处设置防寒沟和防寒隔热板等。

4) 数值仿真的结果可以提供一种直观形象的温度场形态,对于大棚的设计和正常运行具有一定的参考价值和指导意义。

[参考文献]

- [1] 谭建国. 用 ANSYS 6.0 进行有限元分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [2] 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [3] 郇伟, 董仁洁. 日光温室的热环境理论模型[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 160-163.
- [4] 周新群, 董仁洁, 张淑敏, 等. 日光温室外保温蜂窝结构覆盖材料的研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 159-163.
- [5] 孙忠富, 李佑祥, 吴毅明, 等. 北京地区典型日光温室直射光环境模拟与分析[J]. 农业工程学报, 1993, 9(2): 45-51.
- [6] 夏开邦. 塑料与农业节水[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.
- [7] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣. 传热学[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [8] 于红军. 农用塑料制品与加工[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2003.
- [9] 黄锐. 塑料工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] 柳春圃, 侯君伟, 王庆春. 建筑施工常用数据手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [11] 王进涛. 保护地蔬菜生产经营[M]. 北京: 金盾出版社, 2000.
- [12] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.

Simulation research on the thermal environment inside ecological greenhouse in Qinghai-Tibet Plateau

JIANG Yun-chao, WANG San-fan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: ANSYS software is applied to simulate the space temperature field of ecological greenhouse in Qinghai-Tibet Plateau and study the variant rule of temperature in the main space of sewage treatment and vegetables growing in order to provides a scientific reference to the construction of the ecological greenhouse. The result of simulation shows the temperature can keep at 13-22℃ on sunny day and 10-18℃ on cloudy day on the worst condition in winter because of the intensive radiation and special insulation heat, which proves that the temperature in the greenhouse can meet the need of sewage treatment and vegetables growing.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; the ecological greenhouse; space temperature field; numerical simulation