

日光温室内土壤温度对土壤含水率变化的影响

赛音朝格图¹ 马文娟² 塔娜^{1*}

(1. 内蒙古农业大学 机电工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 中国人民解放军陆军装甲兵学院, 北京 100071)

摘要 为探究土壤表层的含水率随土壤温度变化的规律,以呼和浩特地区的日光温室内土壤为研究对象,利用土壤水分-温度传感器测试土壤含水率和土壤温度,采用 Gaussian 函数多峰拟合和线性拟合方法对土壤温度与含水率的关系进行拟合分析。结果表明:在3个试验区域的不同深度土层内,土壤含水率随土壤温度的变化均呈现线性变化规律,且越接近土壤表层,线性关系越显著。通过拟合方程得到的含水率计算值与实测值相对误差小于5%。本研究对日光温室内土壤环境的监测与控制具有指导意义。

关键词 日光温室; 土壤含水率; 土壤温度; 线性拟合

中图分类号 S152.8 **文章编号** 1007-4333(2019)03-0102-07 **文献标志码** A

Effect of soil temperature on soil moisture content in solar greenhouse

Saiyinchaogetu¹, MA Wenjuan², Tana^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2. Academy of Army Armoured Force, Beijing 100071, China)

Abstract To investigate the correlation between the soil moisture and temperature of topsoil, the moisture and temperature changes of soil were measured in the solar greenhouse located in Hohhot. The relationship between soil temperature and moisture content was analyzed by Gaussian function multi-peak fitting and linear fitting. The results showed that the soil moisture content changed linearly with soil temperature in three test areas on different soil layers. Between soil temperature and moisture content, the closer the depth of soil to the soil surface, the more significant of the linear relationship. The relative error of the calculated soil moisture content with the actual data was less than 5%. This study provided guiding significance for monitoring and controlling soil environment in solar greenhouse.

Keywords solar greenhouse; soil moisture content; soil temperature; linear fitting

温室内土壤含水率对作物的生长影响显著,并与土壤温度存在内在关联,这在寒冷干旱地区日光温室冬季生产时尤为明显。探究日光温室内土壤含水率和土壤温度间的变化关系,可为温室内环境调控提供理论基础。研究表明,在不同土壤水分条件下,2种抗寒性不同的盆栽冬小麦均在正常水管理下的细胞活力最佳,取样部位上,叶鞘细胞活力好

于叶片^[1]。目前,对黄瓜栽培条件下,日光温室内土壤含水率对其生长影响的研究包括:利用 Microsoft Excel、SAS 8.1 和 Sigmaplot 12.0 对土壤含水率实测数据进行分析可知,不同土壤水分条件下,黄瓜根系分布受土壤水分动态影响,即土壤含水量过高或过低均不利于培育黄瓜壮苗,且在 0~25 cm 土层黄瓜根系分布比例均可达全部根重的 99% 以上,而最

收稿日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61663038)

第一作者: 赛音朝格图,硕士研究生, E-mail: 516864313@qq.com

通讯作者: 塔娜,教授,博士生导师,主要从事力学在工程中的应用研究, E-mail: jdtana@163.com

深的根系可达 30 cm^[2-3]；采用数值模拟的方法，建立土壤水分动态模型，证明黄瓜常规灌溉时土壤初始含水率以田间持水量的 60%~80%为宜，若土壤初始含水率低于田间持水量的 40%，则不能满足生长需求，而土壤初始含水率过高时，又浪费水资源^[4]。采用小区试验分析不同供水条件对温室作物的影响，研究发现较低的土壤含水量有利于提高作物根区的土壤温度^[5-7]。小区试验方法还可用于研究在滴灌条件下，温室内青茄处于不同生长阶段时，土壤水分对其生长状况的影响，证明任何时段水分亏缺均会降低青茄的耗水量^[8]。当温室具有加温系统时，气温、地温及太阳辐射能的间隙性与不稳定性对作物生长有直接影响，地下土壤温度分布的二维模型、气温和地温之间的三维数值模型证明了增温系统能够提供阴天时的地温需要^[9-10]。在日光温室浅层土壤水媒蓄放热系统中结合热泵加热，建立热泵加热模型，模拟研究不同埋管深度对浅层土壤温度的影响^[11]。

日光温室在我国黄河以北是园艺作物冬季生产主要的生产设施，目前国内外在温室模拟研究方面已经取得了很多重要的成果，但对寒冷干旱地区无加温设备的日光温室内土壤温度与含水率相关性的研究较少。本研究拟以北方寒冷干旱地区典型的“三立一坡”型日光温室为研究对象，全年不间断连续监测室内的土壤温度与含水率，利用线性拟合方法探究日光温室内的土壤含水率随土壤温度变化的规律，以期为提高日光温室土壤特性监测效率，灌水自动化、智能化管理提供依据。

1 材料与方法

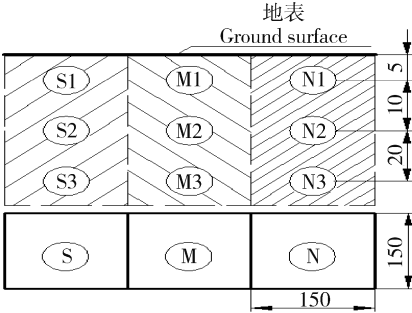
1.1 试验温室

试验温室(图 1)选取内蒙古呼和浩特市西把棚

乡合林村农户的日光温室，位于呼和浩特市近郊(北纬 40°29′,东经 111°47′)。日光温室坐北朝南,东西长 100 m,南北跨度 10 m,脊高 3.5 m;温室间距 6.5 m;南北方向的截面为梯形,后墙体是夯实土墙,前屋面采用钢架结构,保温被为外层草苫与内层再生棉,试验温室内种植油麦菜。

1.2 试验方案与试验器材

在温室内东西方向的中部,跨度方向上选取距温室前底脚 1.75 m 和 3.25 m 处,以及距北墙 1.75 m 处 3 个 1.5 m×1.5 m 试验区,分别表示为 S、M、N 区域。每个区域内,在深度为 5、15 和 25 cm 土层上布置土壤水分-温度传感器(图 2)。土壤传感器采用 MS-10 土壤温度水分传感器(辽宁省大连市大连哲勤科技有限公司),精度为 ±0.5℃,测量范围 -40~85℃。温室外选用 JLC-QTF 型自动气象站(锦州利诚自动化设备公司),包括 LC-WD1 型空气温度传感器,测量范围为 -50~150℃,测量精度 ±0.1℃;TBQ-2LJ 型总辐射传感器,测量范围 0~2 000 W/m²,测量精度 ±5%。



单位: cm Unit: cm

S、M、N 分别为距温室前底脚 1.75 m 和 3.25 m 处,以及距北墙 1.75 m 处 3 个 1.5 m×1.5 m 试验区的代号,图 4、5 同。

S1~S3、M1~M3、N1~N3 为 MS-10 传感器代号。

S、M and N are the codes of three 1.5 m×1.5 m test areas 1.75 and 3.25 m from the front foot of the greenhouse, and 1.75 m from the north wall, respectively. Figs. 4 and 5 are the same.

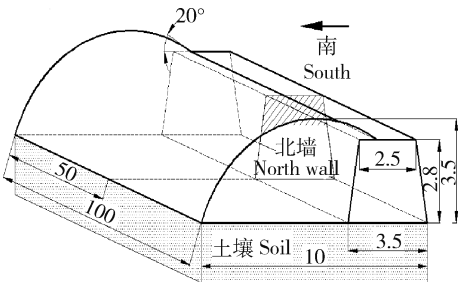
S1-S3, M1-M3 and N1-N3 are the codes of MS-10 sensors.

图 2 土壤传感器布置图

Fig. 2 Soil sensor layout

1.3 拟合方法

Origin 软件有 200 多个内置数学函数表达式,可以分析试验数据并且进行曲线拟合,并根据不同变量之间的关系,建立经验公式或数学模型。本研究应用 Origin 软件中的 Gaussian 函数、线性函数进行数据处理。



单位: m Unit: m

图 1 试验温室外形尺寸

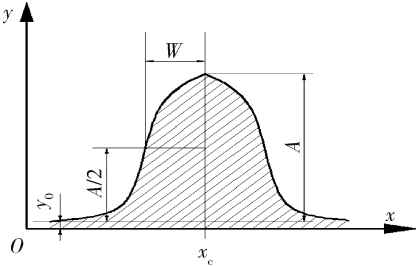
Fig. 1 External dimensions of test greenhouse

1.3.1 Gaussian 函数

本研究应用 Gaussian 函数的多峰拟合曲线(图 3)描述日光温室内不同土层的土壤温度分布,其结果误差小,满足拟合要求。Gaussian 函数表达式为:

$$y = y_0 + \frac{A \cdot \text{Exp}\left(\frac{-4\ln 2(x - x_c)^2}{w^2}\right)}{w \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \quad (1)$$

式中: y_0 为偏移; x_c 为中心; w 为宽度; A 为幅值。



y_0 为偏移; x_c 为中心; w 为宽度; A 为幅值。表 1、2 同。
 y_0 is offset; x_c is center; w is width; A is amplitude. The same in Tables 1 and 2.

图 3 Gaussian 函数曲线

Fig. 3 Gaussian function curve

1.3.2 线性函数

利用线性函数对土壤温度和含水率变化的曲线进行线性拟合分析。线性拟合函数表达式为:

$$Y_i = L + KX_i \quad (2)$$

式中: K 为斜率; L 为待定参数。采用最小二乘法估计方程(3)和(4)的参数,则有:

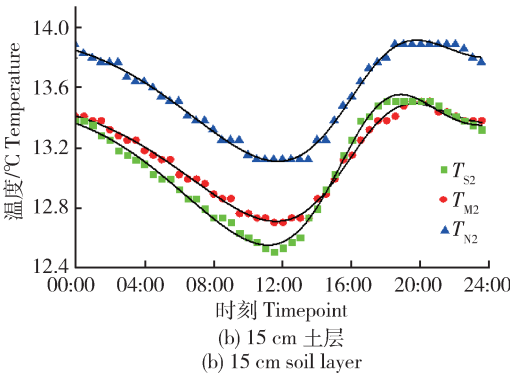
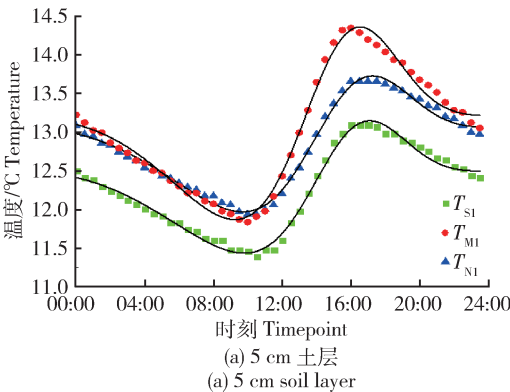
$$L = \bar{Y} - K\bar{X} \quad (3)$$
$$K = \frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

2 结果与讨论

本研究于 2014—2017 年,每年 11 月至下年 4 月不间断对日光温室内环境因子进行监测,测试数据采集间隔为 30 min。本研究数据选自 2016-11-30—2017-04-07 时段。

2.1 日光温室内土壤温度实测值的拟合

为研究温室中 3 个试验区域内不同土层上的土壤温度日变化规律,选取 2016-12-17(晴,微风,呼和浩特地区冬季典型常见的天气条件)的实测数据进行 Gaussian 函数多峰拟合分析。日光温室内 5、15 cm 土层的土壤温度(T)日变化实测值及其拟合曲线见图 4。土层 5 cm 处, S 、 M 、 N 区域的土壤温度(T_{S1} 、 T_{M1} 、 T_{N1})拟合方程的拟合度(R^2)为 0.989 0、0.988 6、0.990 7;土层 15 cm 处, S 、 M 、 N 区域温度(T_{S2} 、 T_{M2} 、 T_{N2})拟合方程的拟合度(R^2)为 0.992 2、0.992 5、0.991 9。说明采用多峰拟合法吻合度较高。由表 1 可知:土层 5、15 cm 处,幅值 A 均下降,中心值 x_c 与宽度 w 都上升,这说明 S 、 M 、 N 区土壤温度到达峰值的时间随土壤深度的增加而延迟。这是由于土层越深,影响土壤温度变化的因素越少,因此土壤温度变化越平缓。



温度 T 的下标 1、2 分别表示 5 和 15 cm 土层。
Temperature (T) subscripts 1 and 2 indicate 5 and 15 cm soil layers.

图 4 日光温室内土壤温度(T)日变化实测值及其拟合

Fig. 4 Diurnal variation of soil temperature (T) in solar greenhouse and its fitting

表 1 日光温室内土壤温度日变化拟合方程系数

Table 1 Coefficient of fitting equation for daily variation of soil temperature in solar greenhouse

试验区 Test area	5 cm 土层 5 cm soil layer				15 cm 土层 15 cm soil layer			
	y_0	x_c	A	w	y_0	x_c	A	w
S	12.759 4	0.463 1	0.763 7(—)	0.520 3	13.490 2	0.531 0	0.667 2(—)↓	0.611 9↑
		0.679 2	0.408 6	0.259 6		0.737 8	0.222 9↓	0.276 0↑
M	13.224 1	0.450 7	0.782 5(—)	0.475 7	13.524 7	0.563 1	0.623 7(—)↓	0.647 8↑
		0.658 2	0.562 9	0.268 6		0.761 3	0.193 1↓	0.292 4↑
N	13.425 4	0.482 5	0.868 9(—)	0.539 9	13.964 6	0.566 4	0.650 2(—)↓	0.647 1↑
		0.682 7	0.493 4	0.281 8		0.766 7	0.194 2↓	0.291 8↑

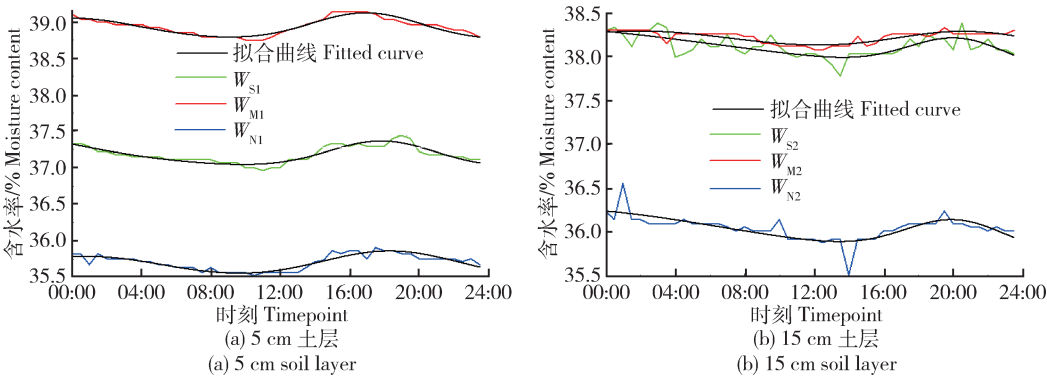
注：“—”表示曲线在 X 轴下方的幅值。“↓”、“↑”表示相对 5 cm 土层,幅值 A、宽度 w 上升或下降,表 2 同。

Note:— indicates the amplitude of the curve below the X axis. ↓ and ↑ indicate that the amplitude A and width w rise or fall relative to the 5 cm soil layer. The same in Table 2.

2.2 日光温室内土壤含水率实测值的拟合

为研究温室中 3 个试验区域内不同土层土壤含水率日变化规律,选取 2016-12-17 的实测数据,采用 Gaussian 函数的谱线分析模块进行多峰拟合。得到日光温室中 3 个不同土壤区域内,土层 5、15 cm 处的土壤含水率(W)日变化曲线(图 5)。5 cm 土层处,S、M、N 区域土壤含水率(W_{S1} 、 W_{M1} 、 W_{N1})拟合方程的拟合度(R^2)为 0.835 3、0.905 2、0.837 4;土层为 15 cm 处,3 个区域土壤含水率(W_{S2} 、 W_{M2} 、 W_{N2})拟合方程的拟合度(R^2)为 0.577 8、0.709 7、0.519 6,说明采用多峰拟合法吻合度较高。由 5、15 cm 处土层的土壤含水率(W)日变化曲

线(图 5)可见,随土壤深度的增加,M 区的含水率下降。这说明 M 区受气温和辐射的影响比其他 2 个区域更为明显。当土表水分蒸发,且蒸发过程持续进行时,表层土壤不断从下层得到水的补给,因此 M 区的含水率降低。将土壤含水率日变化拟合方程的系数提取出来(表 2),分析得出:M 区的偏移 y_0 较大,此区的含水率高即土壤水分多;在 S、N 区,土壤深度增加时偏移 y_0 增大,是因为土壤水分在重力作用下垂直流到下层,导致下层的含水率上升。随着土层深度的增加,幅值 A 均下降,宽度 w 均上升,说明含水率峰值出现的时间发生延迟且变化平缓。



含水率 W 的下标 1、2 表示 5 和 15 cm 土层。

Moisture content (W) subscripts 1 and 2 indicate 5 and 15 cm soil layers.

图 5 日光温室内土壤含水率(W)日变化实测值及其拟合

Fig. 5 Diurnal variation of soil moisture content (W) in solar greenhouse and its fitting

表 2 日光温室内土壤含水率日变化拟合方程系数

Table 2 Coefficient of fitting equation for daily variation of soil moisture content in solar greenhouse

试验区 Test area	5 cm 土层 5 cm soil layer				15 cm 土层 15 cm soil layer			
	y_0	x_c	A	w	y_0	x_c	A	w
S	36.997 2	0.378 5(—)	0.521 0	0.774 2	37.809 1↑	0.305 0(—)	0.683 8↑	1.341 8↑
		0.743 7	0.117 8	0.302 6		0.843 1	0.086 3↓	0.280 8↓
M	38.749 6	0.008 3(—)	0.130 5	0.411 2	38.080 0↓	0.081 6	0.116 5↓	0.517 2↑
		0.705 2	0.121 1	0.309 9		0.857 0	0.085 5↓	0.385 2↑
N	35.513 9	0.037 1	0.151 6	0.446 9	36.101 3↑	0.837 3	0.094 1↓	0.285 9↓
		0.763 3	0.166 3	0.397 9		0.143 8(—)	0.464 6↑	0.983 1↑

2.3 日光温室内土壤含水率与土壤温度变化的拟合方程

为得到日光温室内土壤含水率随土壤温度的变化规律,对 2016-12-17T16:30 的土壤含水率与土壤温度实测数据进行线性拟合分析。对比土层 5 和 15 cm 处的土壤含水率和温度日变化曲线(图 4、图 5)可以看出,3 个区域内土壤含水率与土壤温度的变化趋势较相似。

对温度和含水率实际数据进行线性拟合(图 6),得到土壤含水率(Y_w)与土壤温度(X_T)的变化关系。

土层 5 cm 处:

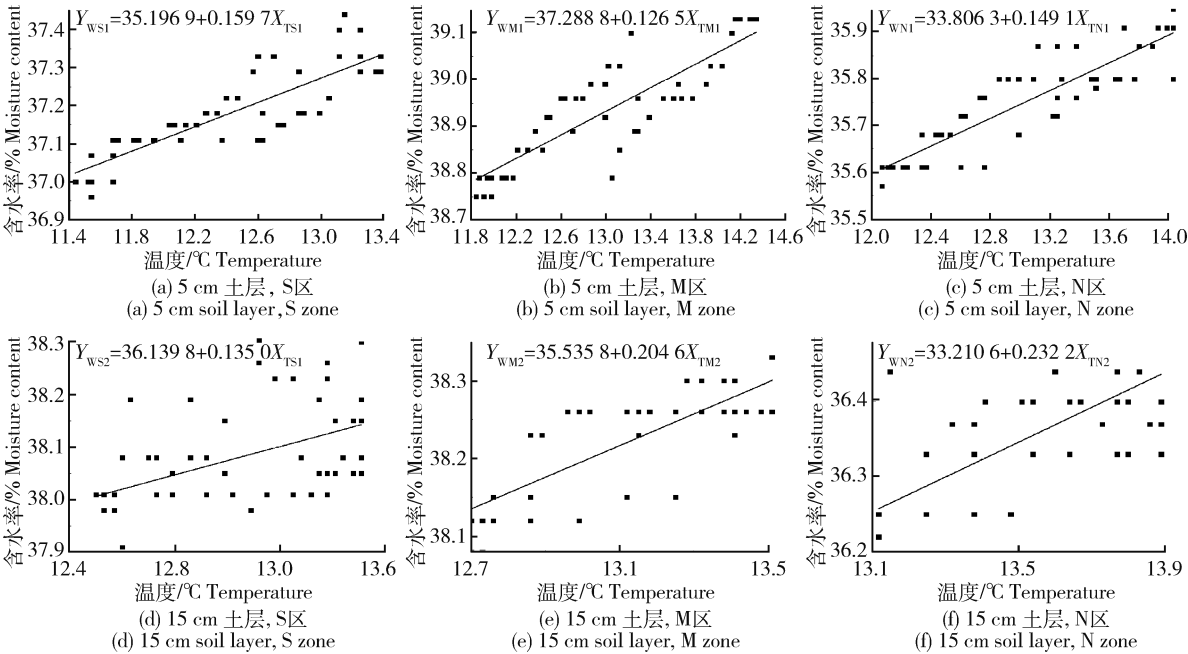
$$\begin{cases} Y_{WS1}=35.196\,9+0.159\,7X_{TS1} \\ Y_{WM1}=37.288\,8+0.126\,5X_{TM1} \\ Y_{WN1}=33.806\,3+0.149\,1X_{TN1} \end{cases} \quad (5)$$

土层 15 cm 处:

$$\begin{cases} Y_{WS2}=36.319\,8+0.135\,0X_{TS2} \\ Y_{WM2}=35.535\,8+0.204\,6X_{TM2} \\ Y_{WN2}=33.210\,6+0.232\,2X_{TN2} \end{cases} \quad (6)$$

土层 5 cm 处,S、M、N 区域的温度-含水率线性拟合方程的拟合度分别为 0.853 4、0.863 9、0.891 7;土层 15 cm 处,3 个区域温度-含水率线性拟合方程的拟合度分别为 0.443 5、0.801 8、0.573 4。土层 25 cm 处,3 个区域温度-含水率线性拟合方程的拟合度偏低,不具备线性方程特性。

对温度和含水率实际数据进行线性拟合(图 6)可知:土层 5、15 cm 处的土壤含水率-土壤温度的线性拟合度高,其中土层 5 cm 处的线性拟合度高于 15 cm 处。



试验日期 2016-12-17,晴天。Test date 2016-12-17,Sunny.

图 6 温室内土壤温度与含水率日变化线性拟合

Fig. 6 Daily linear variation of moisture content and temperature of soil

2.4 拟合方程的修正与验证

对方程(5)和(6)进行修正得到土壤含水率-土壤温度方程。综合分析日光温室土壤温度日变化实测值及其拟合曲线(图 4)以及土壤含水率日变化拟合方程系数(表 2)可以看出： T_{M1} 和 T_{M2} 的变化趋势没有明显差别,但 T_{S1} 和 T_{S2} 、 T_{N1} 和 T_{N2} 随时间变化较大,M 区土壤含水率比较高。S、N 区渗流到下层土壤中的水分较多,M 区渗流到下层的较少。

通过数据分析得知,土层 5 cm 处土壤含水率每隔 1 天,S 区降低 0.161%、M 区降低 0.286%、N 区降低 0.226%左右,而土层 15 cm 处土壤含水率每隔 1 天,S 区降低 0.139%、M 区降低 0.136%、N 区降低 0.165%左右。修正后的土壤含水率(Y_w)随土壤温度(X_T)变化的拟合方程如下。

土层 5 cm 处:

$$\begin{cases} Y_{WS1}=35.196\ 9+0.159\ 7X_{TS1}-0.161Z \\ Y_{WM1}=37.288\ 8+0.126\ 5X_{TM1}-0.286Z \\ Y_{WN1}=33.806\ 3+0.149\ 1X_{TN1}-0.226Z \end{cases} \quad (7)$$

土层 15 cm 处:

$$\begin{cases} Y_{WS2}=36.319\ 8+0.135\ 0X_{TS2}-0.139Z \\ Y_{WM2}=35.535\ 8+0.204\ 6X_{TM2}-0.136Z \\ Y_{WN2}=33.210\ 6+0.232\ 2X_{TN2}-0.165Z \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z 为试验开始距计算时的间隔天数, $Z=0,1,2,\cdots,57$,最大值为浇水周期的天数,其中 2 次浇水时间节点间隔为浇水周期。2016-12-17 日设定为试验开始日期。

利用 3 个试验区不同天气条件下的实测数据对线性方程的准确性进行验证。

选取 2016-12-19($Z=2$)、2016-12-21($Z=4$)、2016-12-23($Z=6$)的试验数据为验证对象,将 3 个区域内不同土层上测点的实测值与计算值进行比较(表 3)可知,土层为 5 cm 处最大相对误差为 2.72%,15 cm 处为 0.54%。

表 3 不同试验日期模拟数据与实测数据的检验

Table 3 Verification of simulated data and measured data on different test dates

试验区 Test area	2016-12-19			2016-12-21			2016-12-23		
	实测值	计算值	相对误差/%	实测值	计算值	相对误差/%	实测值	计算值	相对误差/%
	Measured value	Calculated value	Relative error	Measured value	Calculated value	Relative error	Measured value	Calculated value	Relative error
S1	36.869 6	36.944 0	0.20	36.379 7	36.604 4	0.61	36.232 2	36.404 0	0.47
M1	38.389 8	38.532 9	0.37	37.652 9	37.994 0	0.90	37.109 5	37.862 5	1.99
N1	35.329 4	35.768 5	1.23	34.712 4	35.390 8	1.92	34.288 9	35.247 7	2.72
S2	37.804 5	37.857 1	0.14	37.436 5	37.585 0	0.39	37.141 8	37.343 5	0.54
M2	37.949 5	37.974 4	0.06	37.565 5	37.662 3	0.26	37.252 9	37.537 7	0.76
N2	36.023 6	35.840 6	0.51	35.568 6	35.505 8	0.18	35.339 1	35.335 2	0.01

3 结 论

本研究以北方地区典型的含有内拱棚的“三立一坡”型日光温室为研究对象,利用 Gaussian 函数多峰拟合、线性拟合方法,对土壤含水率与土壤温度的变化关系进行分析研究,得到以下结论:

1)通过实测数据分析可知,随着土壤深度的增加,土壤温度最高值出现的时间发生延迟且最高温度值降低。利用线性拟合方程对土壤表层的温度与

含水率进行分析,得出表层土壤含水率随土壤温度变化而变化的拟合方程。

2)5 cm 土层处,区域 S、M、N 的温度-含水率线性拟合方程的拟合度分别为 0.853 4、0.863 9、0.891 7。15 cm 土层处,线性拟合方程拟合度分别为 0.443 5、0.801 8、0.573 4。

3)根据土壤表层的温度值,利用拟合方程计算得出土壤表层的含水率值,对比实测数据验证了拟合方程的准确性。

参考文献 References

- [1] 付连双,王晓楠,李卓夫,谢冬微,孙莹璐,郑伟. 不同土壤水分处理下冬小麦细胞活力差异比较[J]. 东北农业大学学报, 2014,45(1):6-16
Fu L S, Wang X N, Li Z F, Xie D W, Sun Y L, Zheng W. Difference comparison of winter wheat cell viability under different soil water content treatments [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45 (1): 6-16 (in Chinese)
- [2] 冯嘉玥,邹志荣,陈修斌. 土壤水分对温室春黄瓜苗期生长与生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1242-1245
Feng J Y, Zou Z R, Chen X B. Effect of soil moisture on growth and physiological characteristics of greenhouse spring cucumber during seedling period [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(6): 1242-1245 (in Chinese)
- [3] 范凤翠,张立峰,李志宏,石玉芳,贾建明,刘胜尧,刘俊波. 日光温室黄瓜根系分布特征及其对土壤水分环境的响应[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(11): 4808-4810
Fan F C, Zhang L F, Li Z H, Shi Y F, Jia J M, Liu S Y, Liu J B. Root characteristics of cucumber and its response with soil moisture in greenhouse [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(11): 4808-4810 (in Chinese)
- [4] 王绍辉,任理,张福曼. 日光温室黄瓜栽培条件下土壤水分动态的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 110-114
Wang S H, Ren L, Zhang F M. Numerical simulation of soil moisture dynamics during cucumber crop cultivation in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 110-114 (in Chinese)
- [5] 刘浩,段爱旺,孙景生,梁媛媛. 温室滴灌条件下土壤水分亏缺对番茄产量及其形成过程的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2699-2704
Liu H, Duan A W, Sun J S, Liang Y Y. Effects of soil moisture regime on greenhouse tomato yield and its formation under drip irrigation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2699-2704 (in Chinese)
- [6] 罗勤,陈竹君,闫波,雷金繁,张晓敏,白新禄,周建斌. 水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 449-457
Luo Q, Chen Z J, Yan B, Lei J F, Zhang X M, Bai X L, Zhou J B. Effects of reducing water and fertilizer rates on soil moisture and yield and quality of tomato in solar greenhouse [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 449-457 (in Chinese)
- [7] 罗勤,陈竹君,雷金繁,刘亚莉,周建斌. 水肥减量对日光温室小型西瓜产量品质及土壤水分状况的影响[J]. 北方园艺, 2014(9): 48-53
Luo Q, Chen Z J, Lei J F, Liu Y L, Zhou J B. Effects of reducing water and fertilizer on yield, quality of mini-watermelon and soil moisture in solar greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2014(9): 48-53 (in Chinese)
- [8] 刘浩,孙景生,王聪聪. 土壤水分状况对温室青茄水分利用和外观品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 812-817
Liu H, Sun J S, Wang C C. Effect of soil moisture on water use and appearance of green eggplant in greenhouse conditions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 812-817 (in Chinese)
- [9] 戴巧利. 主动式太阳能空气集热: 土壤蓄热温室增温系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009
Dai Q L. Study on a solar active heating and soil storage system for greenhouses [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009 (in Chinese)
- [10] 戴巧利,左然,李平,张志强,苏文佳,于海群. 主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 164-168
Dai Q L, Zuo R, Li P, Zhang Z Q, Su W J, Yu H Q. Active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouse and its effects [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 164-168 (in Chinese)
- [11] 方慧. 日光温室浅层土壤水媒蓄放热系统及其与热泵结合的试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011
Fang H. Experimental investigation of superficial soil thermal release-storage (by water) combined with heat pump in solar greenhouse [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春