

文章编号: 1001-6791 (1999) 04-0368-07

不同土壤含水率情况下透明塑膜覆盖增温效应的研究

沈荣开, 邓世鹏, 张瑜芳, 黄介生

(武汉水利电力大学水利工程系 湖北 武汉 430072)

摘要: 透明型膜覆盖后, 土-气界面热平衡状况发生变化, 使得覆盖后产生增温效应。通过边界层热平衡分析, 建立了一维热传导数学模型, 模型中考虑覆盖层的光学特性, 忽略土壤水分运动对土壤温度分布的影响, 经与土柱实验数据检验, 表明模型具有良好的精度且塑膜覆盖对土壤热状况有强烈的影响。着重探讨了表土含水率不同所产生的热效应的差异。

关键词: 土壤含水率; 透明塑膜; 覆盖; 增温效应; 数值模拟

中图分类号: P 641.132 文献标识码: A

利用塑料薄膜覆盖农田的技术自 70 年代末期引进中国以后, 推广速度很快, 特别是近年来, 在我国东北高寒地区, 充分利用透明塑膜的增温效应, 使玉米产量得到大幅度的增长, 其推广应用势头更盛。目前全国各地, 利用薄膜覆盖增温保墒, 已成为提高农作物产量的一项重要技术措施。

透明塑膜覆盖后, 由于增加了土壤的净辐射收入, 减少土壤水分的散失, 较之无覆盖的农田, 土壤水、热迁移状况有了明显的改变。通过覆盖层与地面之间边界层的热平衡分析, 根据热扩散理论建立的土壤水、热耦合传输方程即可对塑膜覆盖下的土壤水热状况进行定量分析。本文在 Mahrer 等人研究的基础上研究了透明塑膜覆盖下土层温度动态变化的计算方法, 并特别探讨了不同土壤湿度状况对温度变化的影响。

1 塑膜覆盖条件下土壤-大气界面边界层的能量平衡分析

土壤覆盖后, 其保墒和增温 (或降温) 效果取决于覆盖的材料、土壤质地及含水状况, 根据边界层能量收支状况的分析, 通过土壤剖面水、热输移状况的计算, 即可定量求得覆盖后土壤热状况的变化规律。

地面接收的地球净辐射 (R_n), 在地-气界面中以三种形式进行热量的交换和调整, 其能量平衡方程为

收稿日期: 1998-08-17; 修订日期: 1998-12-14

基金项目: 国家自然科学基金 (59839320) 及, “九五”国家重点科技攻关项目“农田节水灌溉的增产及环境影响效应的应用基础研究”。

作者简介: 沈荣开 (1935-), 男, 广东广州人, 武汉水利电力大学水利工程系教授、博导。主要研究灌排基本理论和 SPAC 系统水热输移理论。

$$R_n - H - G - LE = 0 \quad (1)$$

式中 H (显热交换) 方向向上; G (土壤热流) 方向向下以及 E 为蒸发时取正值, 反之取负值。

薄膜覆盖后, 由于覆盖层的影响, 地表辐射平衡发生了变化, 膜下土壤能量的收支状况也有所改变, 表现为:

(1) 净辐射收入下降 塑膜覆盖后, 对于膜下土壤表面而言, 由于薄膜层对辐射的传输产生一定的阻隔, 进入表土的净辐射有所降低, 在不考虑膜下薄层空气的影响, 且忽略膜下多级反射而以一级反射近似的条件下, 抵达膜下表土的净辐射 R_m 的计算式为

$$R_m = (1 - \alpha) t_s R_s + t_l \epsilon R_1 + \epsilon \sigma T_c^4 - \epsilon \sigma T_g^4 \quad (2)$$

式中 α 为地面总辐射的反射率, t_s 、 t_l 分别为薄膜对短波和长波辐射的透射率; R_s 为太阳总辐射; ϵ 为热辐射发射率; T_c 为地膜温度; R_1 为大气逆辐射; ϵ 为塑料薄膜的散射率; T_g 为表土温度; σ 为斯蒂芬-博茨曼常数。

从式中看出, 受透射率 t_s 及 t_l 的影响, 塑膜覆盖后土壤的短波辐射和长波辐射收入均有所下降, 同时, 由于地表温度的增加, 地表长波辐射 (即 $\epsilon \sigma T_g^4$) 也有所增加, 从而使净辐射 R_m 减弱。

(2) 显热交换 H 减弱 塑膜的存在使得膜下热空气无法与上层冷空气直接进行湍流交换, 这就造成能量传递过程中分子扩散系数远小于湍流扩散系数而减弱显热交换。

(3) 潜热交换 (LE) 趋于零 潜热交换是在水汽的蒸发 (或凝结) 过程中发生的, 薄膜对水汽的不可透性使其与地表间的薄空气层经常处于饱和状态, 当塑膜下表面的水滴足够大时会返回地表, 使得暂时带走的少量潜热又因凝结而释放, 尽管这种水分循环中有热量消耗, 但与其它热消耗相比, 其值基本上可视为零。

综上所述, 塑膜覆盖后, 土壤表面的能量平衡方程可写为

$$R_m - H - G = 0 \quad (3)$$

2 薄膜覆盖条件下, 土壤剖面热状况的数学模型

薄膜覆盖下的地-气系统的数学模型包含两个层面: 一是在垂直方向上按一维热能扩散方程表述的土壤层, 另一个是气温、比湿和风速在水平方向上均被假定为不变的大气边界层。

2.1 土壤层

对于垂向一维剖面而言, 有如下水、热控制方程:

$$C_h \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla (K_h \nabla T_s) - L \nabla (D_\theta \nabla \theta) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D_\theta (\frac{\partial \theta}{\partial z})] + \frac{\partial}{\partial z} [D_T \frac{\partial T_s}{\partial z}] + \frac{\partial K_s}{\partial z} \quad (5)$$

式中 T_s 为土壤温度 (°C); C_h 为土壤体积热容量 ($J / (m^3 \cdot ^\circ C)$); K_h 为土壤导热率 ($W / (m \cdot ^\circ C)$); D_θ 为土壤水扩散系数 (m^2 / s); D_T 为非等温液、汽扩散系数 ($m^2 / (s \cdot ^\circ C)$); K_s 为土壤水力传导度 (m / s); D_θ 为等温液、汽扩散系数 (m^2 / s); L 为体积汽化潜热 (J / m^3)。

2.2 表土与覆盖层界面的能量平衡

根据前述能量平衡方程式 (3) 和辐射平衡方程式 (2), 可得出塑膜覆盖条件下, 土壤-塑膜层能量平衡方程为

$$(1 - \alpha)t_s R_s + t_1 \epsilon R_1 - H_0 - G + \epsilon \epsilon \sigma T_c^4 - \epsilon \sigma T_g^4 = 0 \quad (6)$$

式中 H_0 为地表到覆盖层的显热通量 (W/m^2), 按下式计算^[11]:

$$H_0 = 0.4\rho C(T_s - T_c) \quad (7)$$

式中 ρ 为空气密度 (kg/m^3), C 为空气定压比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), T_s 为地表温度 ($^\circ\text{C}$), T_c 为覆盖层表温度 ($^\circ\text{C}$).

土壤热通量 G (W/m^2) 是由于表层土壤与深层土壤存在温差由热的传导作用所产生, 其值决定于土壤温度梯度和土壤导热率, 其计算式为

$$G = K_h \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (8)$$

对于覆盖层, 能量平衡方程为

$$\delta R_s + \epsilon \delta R_1 + H_0 - H + \epsilon \epsilon \sigma T_g^4 - 2\epsilon \sigma T_c^4 = 0 \quad (9)$$

式中 δ 为覆盖层对太阳辐射的吸收率。

显热交换是由于塑膜表面与大气之间在垂直方向上的湍流扩散作用引起的, 其热量传输通量方程为

$$H = C_p \rho (T_a - T_z) / r_{ah} \quad (10)$$

式中 H 为显热通量 (W/m^2), C_p 为空气定压比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), ρ 为空气密度 (kg/m^3), T_a 为膜表面空气温度 ($^\circ\text{C}$), T_z 为参照高度 (一般取 2m) 处的气温 ($^\circ\text{C}$), r_{ah} 为空气对显热通量的阻抗 (s/m), 称空气动力学阻力。

太阳总辐射随计算点的地理位置 (纬度) 和季度而异, 其昼夜变化可按正弦曲线描述, R_s 的计算式为

$$R_s = (\pi/2) \cdot R_a / N \sin\left(\frac{t - SN - N/2}{N}\pi\right) \quad (11)$$

式中 R_a (W/m^2) 为天空辐射量, 即晴空条件下可能有的太阳总辐射, 在没有实测资料时, 可采用经验公式计算; N 为天文上可照时数 (h)

长波辐射 R_1 , 按 Van Bavel et al (1975)^[12] 据 Brunt 公式导出的形式, 为

$$R_1 = \sigma (T_a + 273.16)^4 [0.605 + 0.048(1370H_a)^{12}] \quad (12)$$

式中 T_a 为气温 ($^\circ\text{C}$); H_a 为空气绝对湿度 (kg/m^3), 与露点温度 T_d ($^\circ\text{C}$) 有关, 其计算为

$$H_a = 1.323 \exp[17.27T_d / (T_d + 237.3)] / (T_a + 273.16) \quad (13)$$

2.3 边界条件

上边界以土壤地表热通量为控制, 表示为

$$-K_h \frac{\partial T_s}{\partial Z} = G(t) \quad (14)$$

下边界可考虑按一类边界处理。

3 土壤湿度状况对塑膜覆盖土壤增温影响的试验及数值模拟

覆盖后土壤温度的变化与覆盖材料和土壤本身的状况有关, 土壤含水率不同, 其热容量值不同, 覆盖后将产生不同的增温效果, 本文着重对此进行定量分析。

试验是在砂壤土土柱 (扰动土, 容重 1.39) 中进行的, 土柱高 60 cm, 直径 15 cm, 分裸露

与覆盖两组, 土壤含水率分别为 10%、18%、26%、35% (体积含水率) 共八个土柱, 在土柱的不同深度 (0、5、10、20、40、60 cm) 埋设温度计, 观测温度昼夜变化, 土柱置放在露天四周不受干扰的地面上。为简化计算过程, 数值模拟中, 近似地认为含水率剖面不随时间和空间变化, 并忽略土壤水分运动对温度分布的影响, 计算按垂向一维热传输考虑。

3.1 模型参数的选取

(1) 气象参数 由实验测得。

(2) 辐射参数 按经验公式 (11) 和 (12) 计算太阳短波和长波辐射。

(3) 光学参数 参照 Mahrer^[3,4]、Liakatas^[5] 等人的研究结果, 计算中覆盖层的透射率 t_s 取 0.40, t_l 取 0.78, 放射率 ϵ_c 取 0.9, 吸收率 δ 取 0.05。

地表的反射率 α 和散射率按 Var Bavel et al (1975) 的研究, 取

$$\alpha = \begin{cases} 0.35 - \theta & 0.10 < \theta < 0.25 \\ 0.1 & \theta < 0.25 \\ 0.25 & \theta < 0.10 \end{cases}$$

$$\epsilon = 0.9 + 0.18\theta \quad (15)$$

式中 θ 为表土含水率 (m^3/m^3)。

(4) 土壤热参数 土壤导热率 K_h 按 Sang-Ok Chang (1987)^[6] 推荐的表达式, 即

$$K_h = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{1/2} \quad (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})) \quad (16)$$

式中 b_1 、 b_2 、 b_3 为经验系数, 依土质而异, 本文取 $b_1 = 0.243$, $b_2 = 0.393$, $b_3 = 1.534$ 。

土壤体积热容量 C_h 按以下经验公式计算:

$$C = 1.925(1 - \theta) + 4.184\theta \quad (17)$$

式中 θ 为饱和含水率 (m^3/m^3)。

3.2 模型求解

(1) 节点方程 在数值计算中, 忽略土壤水的运动和土层中的潜热变化, 在一维情况下, 控制方程简化为

$$C_h \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla (K_h \nabla T_s)$$

采用中心差分格式经移项整理后, 得三节点方程为

$$a_i T_{si}^{k+1} + b_i T_{si}^{k+1} + C_i T_{si+1}^{k+1} = d_i \quad (18)$$

式中 $a_i = -\frac{r_1}{2} K_h$, $b_i = C_h + 2K_h$, $C_i = -\frac{r_i}{2} K_h$,

$$d_i = \frac{r_1}{2} K_h T_{si-1}^k + [C_h - r_1 K_h] T_{hsi} + \frac{r_1}{2} K_h T_{si+1}^k, \quad r_1 = \Delta t / \Delta Z^2$$

(2) 计算上、下边界条件 计算中下边界采用已知一类边界 (按实测下边界温度给定), 上边界按二类边界, 近似地以 $i = \frac{1}{2}$ 节点处的热通量 $G_{\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}$ 代表地表热通量 $G_0^{k+\frac{1}{2}}$, 据方程 (14), 有

$$G_0^{k+\frac{1}{2}} \doteq G_{\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = -K_h \frac{T_{s_1}^{k+\frac{1}{2}} - T_{s_0}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (19)$$

方程 (19) 涉及边界处时段末的温度值 ($T_{s_0}^{k+\frac{1}{2}}$), 该值可通过地表热平衡方程联立求解, 将地表热通量方程 (19)、大气显热方程 (1) 和膜下显热方程 (7) 分别代入覆盖层和地表面热平衡方程 (9)、(6), 得

$$(1 - \alpha)t_s R_s + t_l \epsilon R_l - 0.4\rho C_p(T_g - T_c) - K_h(T_g - T_{s1})/\Delta Z + \epsilon\epsilon_0\sigma T_c^4 - \epsilon\sigma T_g^4 = 0 \quad (20)$$

$$\delta R_s + \epsilon\delta R_l + 0.4\rho C_p(T_g - T_c) - \rho C_p(T_c - T_z)/r_{ah} + \epsilon\epsilon_0\sigma T_g^4 - 2\epsilon\sigma T_c^4 = 0 \quad (21)$$

(20)、(21) 式除 T_g (即 T_{s0})、 T_c 外, 尚有 T_{s1} 值未知, 本文将 T_{s1}^{k+1} 值用显格式推求, 即

$$C_h T_{s1}^{k+1} = r_1 K_h T_{s0}^k + (C_h - 2r_1 K_h) T_{s1}^k + r_1 K_h T_{s2}^k \quad (22)$$

(20)、(21) 式简写成

$$\begin{cases} f_1(T_g, T_c) = 0 \\ f_2(T_g, T_c) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

用 Newton-Raphson 非线性方程组迭代法求解, 即可得出时段末的地表温度 T_g 和覆盖盖膜的表面温度 T_c 。

在推算无覆盖土柱的温度变化时, 上边界条件引入地面热平衡方程, 增加潜热通量项, 其方程式为

$$(1 - \alpha)R_s + R_l - \epsilon\delta T_{s0}^4 - \rho C_p(T_z - T_{s0})/r_{ah} - K_h(T_{s0} - T_{s1})/\Delta Z - LE = 0 \quad (24)$$

潜热通量 LE 按下式计算:

$$LE = L \frac{H_0 - H_a}{1000r_{ah}} \quad (25)$$

式中 H_a 为空气绝对湿度 (kg/m^3), 见 (13) 式;; L 为蒸发潜热 (J/kg)。 H_0 为地表的空气绝对湿度 (kg/m^3), 按下式求得

$$H_0 = H_0^* \exp(h_1/46.97(T_{s0} + 273.2)) \quad (26)$$

式中 H_0^* 为地表温度 T_{s0} 对应的饱和湿度, h_1 为地表土水势 (m)。

$$H_0^* = 1.323 \exp[17.27T_{s0}/(T_{s0} + 237.3)]/(T_{s0} + 273.2) \quad (27)$$

(24) 式中, 只有 T_{s0} 为未知数, 可用一元高次方程的迭代计算方法求解。

4 结果与讨论

4.1 模型的验证

由于上述数学模型求解的复杂, 目前尚无解析解可对数值模拟结果进行验证, 以下用土柱试验的实测结果对其进行检验。必须指出, 由于试验条件的限制, 试验土柱的直径不可能过大, 在温度的传导中, 周边的影响不容忽视, 亦即是说, 严格的讲, 针对所采用的试验模型, 其温度场在空间上应按三维问题或柱坐标二维考虑。

根据透明塑膜覆盖和裸地不同的土壤含水率处理, 对土柱温度变化过程进行 48 h 的模拟计算, 与相对应的昼夜土柱土表和土面以下 5 cm 处的温度变化过程的实测值进行对照, 总体而言, 模拟结果是令人满意的, 说明可以用本计算方法研究无作物生长情况下盖膜后土壤温度动态变化的问题。图 1 是覆盖土柱不同土壤含水率时 5 cm 处温度变化过程对照图 (图中 0 时为上午 8 时)。

4.2 透明塑膜覆盖的增温效应

根据土壤含水率与热容量的关系, 分别对不同含水率条件下 0~5 cm 和 5~10 cm 两个土层的日平均热能增量进行计算, 表明其对土壤含水率的差异是敏感的, 其增量分别从土壤含水率为 10% 时的 5.10 J/cm^3 和 2.6 J/cm^3 增加到土壤含水率为 35% 时的 9.81 J/cm^3 和 4.53 J/cm^3 ,

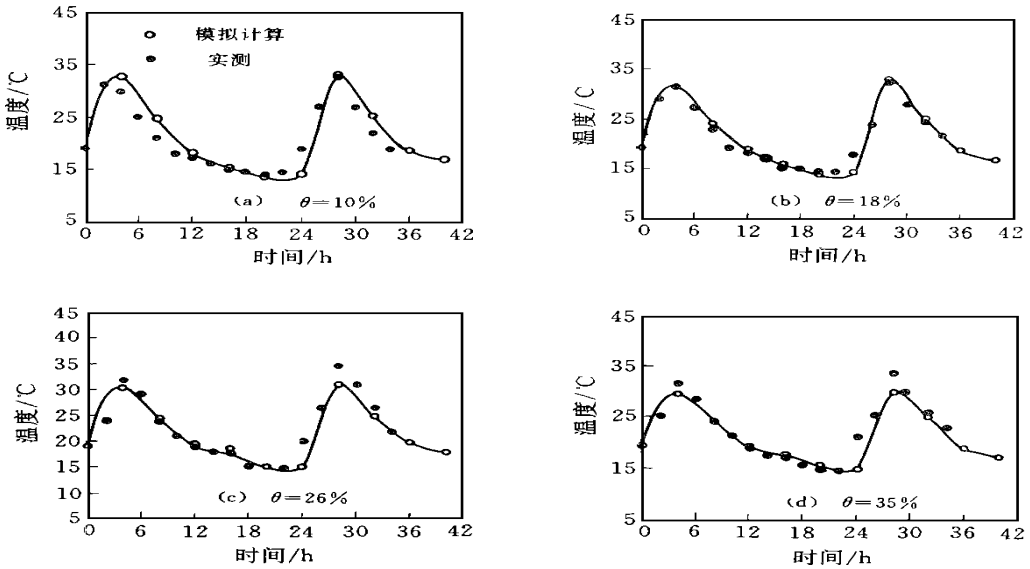


图 1 覆盖地 5 cm 深度温度变化过程图

Fig. 1. Observed and predicted soil temperature at the depth of 5 cm in a loam sand soil column mulched with transparent polyethylene

且呈良好的线性关系, 如图 2 所示, 得线性回归方程分别为

$$\Delta TE = 3.425 + 18.426 \theta \quad (0 \sim 5 \text{ cm 土层})$$

$$\Delta TE = 2.207 + 6.428 \theta \quad (5 \sim 10 \text{ cm 土层})$$

式中 ΔTE 为土壤热能日平均增量 (相对于无覆盖土地而言), θ 为土壤体积含水率

4.3 透明塑膜覆盖增温效果计算

以下对哈尔滨和北京两地 10 月和 4 月的土壤温度进行覆盖增温效果计算, 据两地 4 月和 10 月多年平均气象资料进行模拟计算, 得不同土壤含水率时的土壤日均增温预测值如表所示。可以看出, 在我国北方地区, 应用透明塑膜覆盖, 可以大幅度地提高土壤温度, 从而改善作物生长条件, 提高作物产量。本文推荐的数值计算方法, 对使用透明塑膜覆盖后增温效果的定量分析提供了可能。

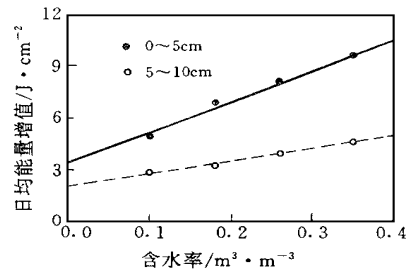


图 2 日均热能增量与含水率的关系
Fig. 2. Relationship between mean daily heat energy increment and soil moisture

表 1 北京、哈尔滨地区不同土壤含水率条件下透明塑膜覆盖的日均增温预测值 ()

Table 1. Predicted mean daily surface soil temperature increment with different soil moisture under the mulched with transparent polyethylene condition in Beijing and Harbin region

地 区	土 壤 含 水 率		
	15%	25%	38%
北 京	1.93	2.18	2.34
哈 尔 滨	3.04	3.33	3.51

参考文献:

- [1] Kimball B A. Simulation of the energy balance of a greenhouse[J]. *Agric. Meteorol.* 1973, 11: 243 ~ 260.
- [2] Van Bavel C H M, D I Hillel. A simulation study of soil heat and moisture dynamics and affected by a dry mulch, in *Proceedings 1975 Summer Computer Simulation Conference*[M]. San Francisco, CA Simulation Councils, Inc. La Jolla, California, 1975. 815 ~ 821.
- [3] Mahrer Y. Prediction of soil temperature of a soil mulched with transparent polyethylene[J], *J. Appl. Meteorol.* 1979, 18:1263 ~ 1267.
- [4] Mahrer Y, J Katan. Spatial soil temperature regime under transparent Polyethylene mulch: Numerical and experimental studies[J]. *Soil Sci.* 1981, 131: 82 ~ 87.
- [5] Liakatas A, *et al.* Measurements of the heat balance under plastic mulches[J], *Agric. and Fore. Meteorology*, 1986, 36:227 ~ 239.
- [6] Chung S O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J], *Water Resour. Res.* 1987, 23(12):2175 ~ 2186.

Temperature Regimes Effected by Different Soil Moisture in Soil Mulched with Transparent Polyethylene

SHEN Rong-kai, DENG Shi-peng, ZHANG Yu-fang, HUANG Jie-sheng

(*Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072, China*)

Abstract: In order to study the effect of soil mulching with transparent polyethylene film upon the soil temperature regimes with various soil water content a numerical one dimensional model has been developed. Optical properties of the cover was considered and the effect of soil water movement on soil temperature distribution was ignored. The ability of the model to predict the temperature regimes of the mulched soil under different soil water content was tested. The calculated results agree well with the observed data. It was shown that the temperature regimes are significantly influenced by the polyethylene film. The model is used to calculate the soil heating by the transparent polyethylene film mulched in the area which inputs the data of meteorology information.

Key words: soil water content; transparent polyethylene film; mulch; soil temperature; numerical model