

591-601

756(5)

第16卷第6期

生态学报

Vol. 16, No. 6

1996年12月

ACTA ECOLOGICA SINICA

Dec., 1996

耕作的数值模型及其应用

杨邦杰^{*}

534

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

A

摘要 种子发芽与出苗主要受土壤水分与温度的影响。在研究非均质土壤起伏不平的地表与大气间水分能量交换过程的数值分析方法的基础上, 发展了耕作对土壤水分与温度影响的基于有限元分析方法的数值模型。作为应用研究, 讨论了不同的耕作方式如镇压, 少耕与沟种垄作对土壤水分、温度的影响, 并介绍了模型用于陕北的沟种设计。本研究为农业生态学提供了一种基于模型-模拟-优化的定量分析方法。

关键词: 耕作, 土壤水分, 土壤温度, 有限元, 数值模型。

A FINITE ELEMENT MODEL OF TILLAGE OPERATIONS AND ITS APPLICATION

Yang Bangjie

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

Abstract The soil moisture and temperature are key factors to seed germination and seedling emergence. A finite element model was developed to study the seedbed soil moisture and temperature as affected by tillage operations based on the numerical analysis method of heat and water exchange between the atmosphere and heterogeneous soil surface developed by the author. A simulation study shows effects of different tillage operations such as level sowing, minimum tillage and ridge and furrow tillage on the seedbed moisture and temperature. The model was also used to optimize the furrow sowing in North-Weatern China. This study developed a quantitative method for the agro-ecological research based on the methodology of modeling-simulation optimization.

Key words: soil moisture, soil temperature, tillage, modeling, finite element method.

种子发芽与出苗受到土壤水-气-热状况的影响, 土壤水分与温度是主要的限制因子。耕作是对土壤生态系统的人工调控, 目的是要为种子发芽提供适宜的环境。

* 作者现在通讯地址: 中国农业工程研究设计院, 北京, 100026

收稿日期: 1995-01-20, 修改稿收到日期: 1995-02-26

在干旱与半干旱地区,耕作研究的重要目的是怎样保持土壤水分。耕层土壤的水分保持与温度状况受到土壤质地、耕层构造以及环境因素的影响。而耕层构造是人为的,是由耕播机具、耕作方式形成的。这一系列复杂因素影响土壤的水热传递过程。采用适合的耕作措施才能保证土壤有良好的水热条件供种子发芽。中国幅员辽阔,土壤与环境条件差异很大,并有长期精耕细作的传统。一时一地的田间试验由于没有揭示这一复杂过程的机理而缺乏普适性,难以在其它地区推广。在这些复杂因素之间建立数学模型进行模拟研究,就可能对土壤水热传递过程与土壤质地、耕层构造、环境因素、工程措施之间的复杂关系有深入的了解,为耕作机具与耕作方式的研究提供科学的依据。

国外对耕作模型的研究集中在作物生长期的管理,典型的工作例如 NTRM(Nitrogen-Tillage-Residue Model)模型^[1]。本项研究着重种子发芽与出苗的数天之内的主要限制因子土壤水分和温度与土壤质地、耕层构造以及环境因素的关系。力求用数学物理模型揭示这一复杂过程的机理,使耕作研究具有普适性。

作者在提出非均质土壤起伏不平的地表与大气间水分能量交换过程的数值分析方法的基础上,发展了耕作对土壤水热运动影响的基于有限元分析方法的数值模型,并用于干旱与半干旱地区的耕作研究。为农业生态学研究提供了一种基于模型-模拟-优化的定量分析方法。

1 耕作对土壤水分温度影响的数值模型

1.1 耕作模式与耕作的数值模型

耕作改变了表层土壤的密度,如平作与镇压(图 1-a);或使地表土壤不均匀,例如少耕(图 1-b)与覆盖(图 1-c);或使地表起伏不平,如沟种垄作(图 1-d)。要分析这样的耕作方式对土壤水热条件的影响,首先要解决土壤-大气边界上的水热通量的计算方法——即首先要解决非均质土壤、起伏不平的地表上的蒸发过程的分析方法。从数学的角度来看,图 1-a 的情况下,水热只作垂直方向运动,是一维问题。图 1-b, c, d 中,水热不仅作垂直方向运动,也作水平运动,是二维问题。

作者在研究一维土壤蒸发过程的数值模型的基础上提出了二维土壤蒸发过程的数值分析方法^[2, 3],并解决了参数与土壤

温度、水分、质地以及耕作的关系,例如:沟垄上的空气动力学阻力的计算方法,不同土壤表面处理对发射率的影响^[4],使镇压、少耕、沟种垄作等复杂的模拟得以实现^[1]。

设计耕作数值模型的主要思路是:(1)应用有限元法,把非均质土壤分成均质单元,把二维问题分解成一维问题,计算土壤-大气边界上的水热通量;(2)解土壤水热运动方程

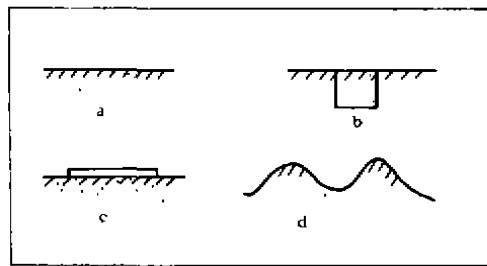


图 1 耕作模式

a. 平作与镇压 b. 少耕 c. 覆盖 d. 沟垄

Fig. 1 Tillage patterns

a. level sowing and compaction, b. minimum tillage, c. mulching, d. furrow and ridge

求土壤水分温度分布;(3)模拟计算并分析耕作方式与参数对苗床水热条件的影响,优化耕作设计。

1.2 土壤水热运动方程

土壤中的水热耦合运动可以用以土壤基质势为变量的 Philip 方程来表达^{[5], [1]}:

$$C_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K_w \nabla \psi) - \nabla \cdot (D_{T_w} \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1)$$

$$C_k \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_l L \nabla \cdot (K_s \nabla \psi) \quad (2)$$

其中 $C_w(m^{-1})$ 为比水容量, $\psi(m)$ 为土壤水的基质势, $t(s)$ 为时间, $D_{T_w}(m^2/s^{\circ}C)$ 是与温度梯度有关的水汽扩散率, $T(^{\circ}C)$ 土壤温度, $K(m/s)$ 为非饱和土壤导水率, $z(m)$ 为向上为正的坐标, $C_k(J/m^3 \cdot ^{\circ}C)$ 为土壤热容量, $\lambda(J/m \cdot s \cdot ^{\circ}C)$ 为导热率, $\rho_l(kg/m^3)$ 为液态水密度, $L(J/kg)$ 为水的汽化潜热, K_s 是水汽在基质势梯度下的当量导水率。

$$K_w = K + K_v \quad (3)$$

方程组(1)(2)在土壤大气界面上应满足的边界条件为:

$$-K_w \frac{\partial \psi}{\partial n} - D_{T_w} \frac{\partial T}{\partial n} - K = E_s(x, z, t) \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \rho_l L K_s \frac{\partial \psi}{\partial n} = S(x, z, t) \quad (5)$$

n 为边界 (x, z) 处的法向, $E_s(m/s)$ 是时刻 t 边界 (x, z) 处的水汽通量(不下雨时为蒸发率), $S(W/m^2)$ 是时刻 t 边界 (x, z) 处的热通量。

下边界条件可以根据实测值在一定深度上取定通量,初始条件为实测的土壤水分与温度分布。

1.3 有限元解

方程组(1)~(5), 加上边界条件与初始条件, 可以用有限元法求解^[1], 分析复杂边界条件下土壤水分温度分布。采用的有限元网格见参考文献[2, 3]。网格的设计方法是: 温度与水分变化快的地表用较细网格, 进行数值试验, 直到不能改善精度为止。当然, 必须考虑能容忍的计算时间。

1.4 边界条件的计算

作为耕作模型, 计算时间一般为 1 周(从播种到出苗), 可以设计算深度为 1 m。作为下边界条件, 该处的水分与温度可以根据实测取为定值。以下讨论上边界条件的计算方法。

1.4.1 平作模型 平作模型可以采用一维模型的算法^[2, 6], 首先根据地表能量平衡计算地表温度, 然后根据地表温度计算边界通量。

1.4.2 少耕模型 对于少耕法形成的地表平坦的苗床, 已耕地与未耕地的土壤孔隙度不同, 而有不同的水热运动参数, 可用有限元方法把土壤剖面分成若干个单元(图 1-b), 用一维模型计算表层每一单元的表面温度与蒸发率。分析能量平衡时, 特别要考虑到未耕与已耕表面的发射率与反射率是不相同的^[4]。

1.4.3 沟垄耕作模型中边界条件的计算^[1] 把地表分成若干段, 每一段为一个单元, 能量平衡分析是对地表的每一单元进行的。考虑到起伏不平的地表对风速与辐射的影响, 求出每一单元瞬时的总辐射之后, 则可按一维问题的分析过程逐次求地表每一单元的表面温度

与蒸发率。

1.5 土壤参数^[1] 土壤水分特征曲线 $\psi(\theta)$ 与为非饱和导水率 $K(\theta)$ 是测定的, 比水容量 C_w 可以根据土壤水分特征曲线计算。土壤导热率 λ 与热容量 C_s 可以根据土壤质地与含水量计算。与温度梯度有关的水汽扩散率 D_{T_v} 与水汽在基质势梯度下的当量导水率 K_v 也是可以计算的^[5]。

1.6 计算程序 根据以上原理设计了研究耕作对土壤水分温度分布影响的计算机模拟程序 SMT (Computer program for simulation of soil moisture and temperature as affected by tillage operations)^[1]。程序框图见图 2, 计算过程如下:

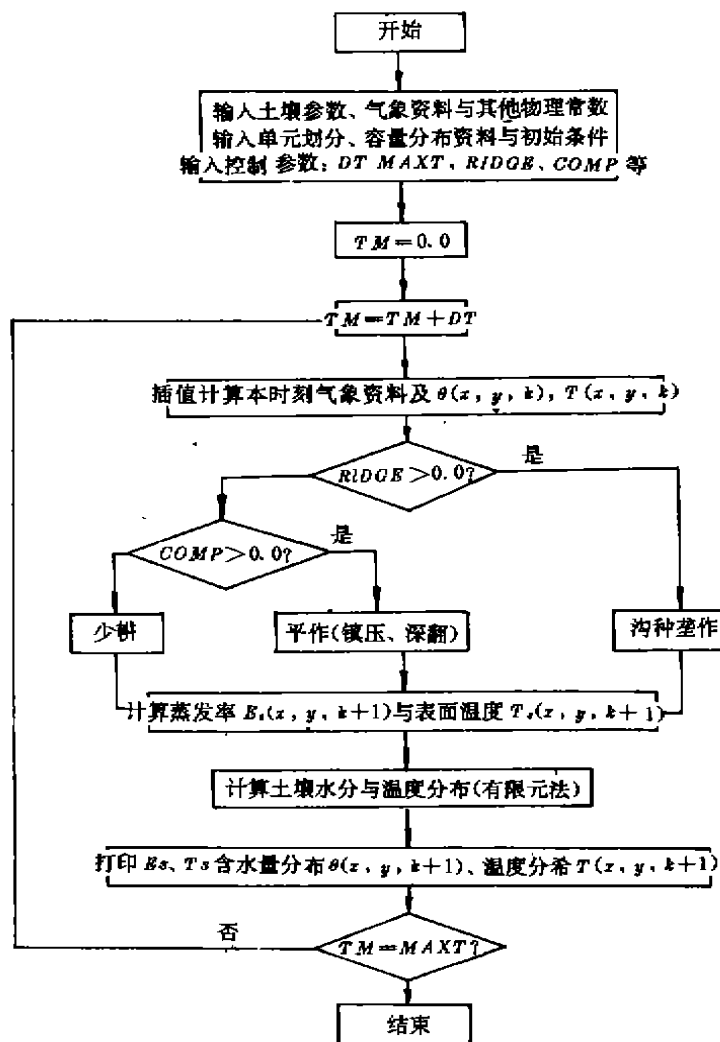


图 2 耕作对土壤水分温度分布影响的计算机模拟程序

Fig. 2 Computer program for simulation of soil moisture and temperature as effected by tillage operations

(1) 输入资料包括: 1) 土壤参数、气象资料以及有关的常数; 2) 单元分割、容重分布、初始条件, 如果计算沟垄问题, 还要输入纬度、沟垄方位等资料; 3) 控制参数: 时间步长 $DT(i) (i=1, 2, 3)$ (分别为初始时间步长、昼与夜间时间步长), 最大计算时间 MAXT。RIDGE > 0.0 , 则计算沟垄问题; COMP > 0.0 , 则计算少耕问题; RIDGE = 0.0 与 COMP = 0.0 则计算一维问题。(2) 插值计算当前时刻的气象资料并用 $t(k)$ 时刻的温度与含水量分布作为 $t(k+1)$ 的初值; (3) 根据 RIDGE、COMP 的值决定要计算的问题; (4) 计算蒸发率 E_s (或入渗率)、表面温度 T_s , 从而决定边界上的水热通量 E_s 与 S ; (5) 解水热运动方程组求 $t(k+1)$ 时刻的土壤温度与含水量分布; (6) 如果需要, 则打印结果, 否则进行下一时间步的计算; (7) 计算时间到 MAXT 则停机。

1.7 模型的验证

模型的验证于 1987 年在中国科学院禹城综合试验站进行^[1, 2, 5]。1991 年在西澳大利亚再次进行了验证^[2]。西澳大利亚为地中海式气候, 土壤条件也完全不同(砂粒含量 95% 以上)。这一田间试验说明这一模型可以用于环境条件完全不同的地区, 具有普适性。

2 耕作对土壤水分温度影响的数值模拟

模拟分析几种常见的耕作方法如镇压、少耕、沟种对土壤水分温度分布的影响。

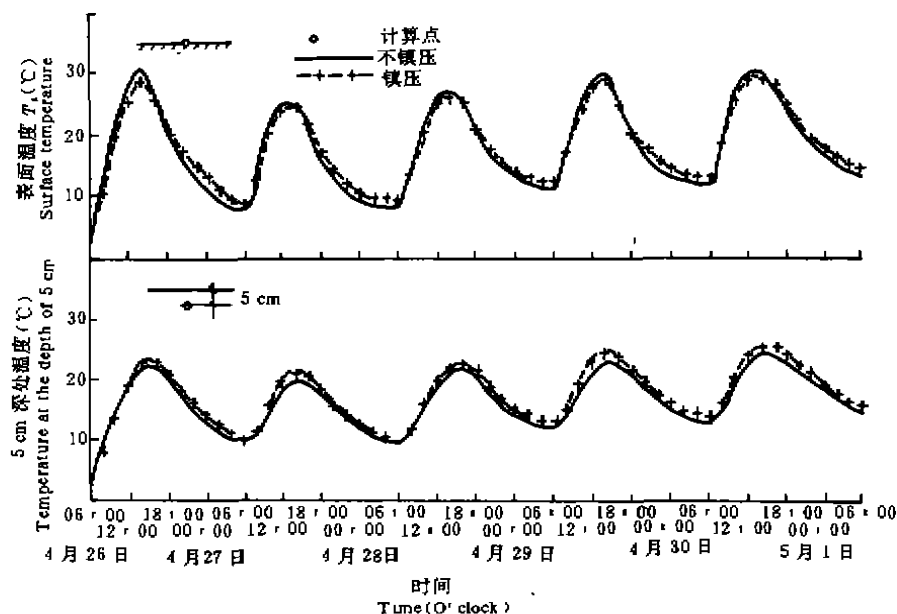


图3 镇压对土壤温度的影响

Fig. 3 The effect of compaction on soil temperature

- 2) Yang Bangjie, Blachwell P S and Nickolson D F. *Numerical simulation of heat movement and water loss from furrow-sown water repellent sand*. Conference of Working Group MV of the International Society of Soil Sciences. Cornell University, USA. 1992

假定播种深度为 5 cm, 气象条件、土壤条件采用山东春播期间的实测值^[1]。计算时间为 5 d。

2.1 镇压

设耕深为 15 cm, 耕层容重 1.15~1.20 g/cm³, 镇压后表层 5 cm 容重为 1.3 g/cm³(图 3)。

2.1.1 镇压对温度的影响 图 3 列出了镇压对表面温度与 5 cm 深处温度的影响。镇压使表面温度降低了 1.5℃, 但 5 cm 处的温度升高 0.75~1℃。这是由于镇压使表层孔隙度减小, 导热率增大; 表面平整, 反射率增大, 能量收入减小; 使表面温度降低。然后, 由于播种后镇压深度仅达 5 cm 左右, 下面仍为松土, 其导热率小, 表层迅速传来的热量不易传走, 苗床温度反而增高。

2.1.2 镇压对水分的影响 图 4 列出了镇压对含水量的影响。不镇压则表层松土很快风干, 镇压则有利于深层水分向表层运动, 5 cm 深处的水分有所增加。

2.2 少耕

设在未耕地上行距为 60 cm, 耕松部分耕宽分别为 30 与 10 cm, 耕深为 10 cm。

2.2.1 少耕对温度的影响 图 5 上图列出了不同耕宽对 5 cm 深处土壤温度的影响, 开沟宽时温度可升高。

开沟宽时, 松土部分增加。松土表面反射率小, 导热率也小, 得到的能量多而且不易导入深层, 使苗床土壤温度增高。春种期间地表在播种后 1~2 d 就风干了, 蒸发率很小。

2.2.2 少耕对水分的影响 图 5 下图为两种不同耕法对 5 cm 深处土壤水分的影响, 开沟窄时水分高。松土孔隙大、温度高, 水分损失快。因此, 水分损失与松土宽度有关, 越宽水分越易损失, 而与下面的苗床形状关系不大。

2.3 沟种垄作

沟垄形的苗床要比上述两种方法更能调节土壤温度与水分。

2.3.1 不同沟深(或垄高)的影响 图 6 上图列出了不同沟深对沟中 5 cm 深处温度的影响, 沟中温度由于增加垄的高度而降低 1℃。图 6 下图为不同沟深对沟中水分的影响, 播种后第 5 d, 沟中 5 cm 处的含水量沟深时高。

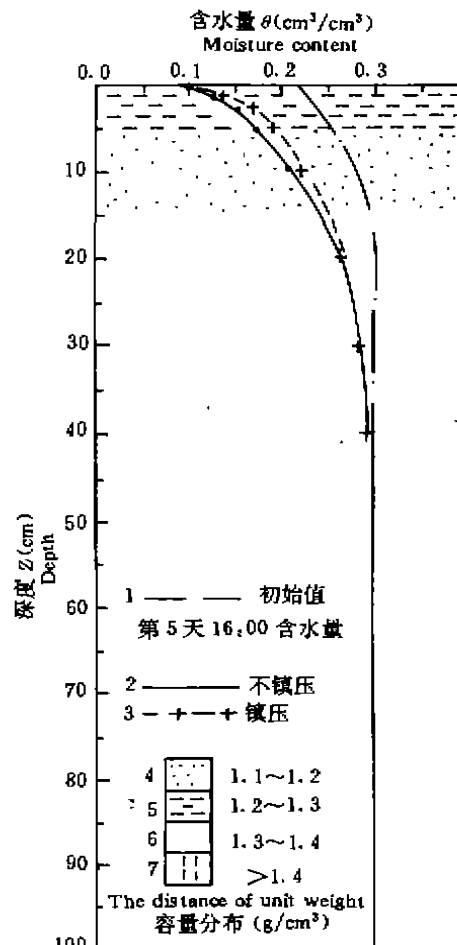


图 4 镇压对土壤水分的影响

Fig. 4 The effect of compaction on soil moisture

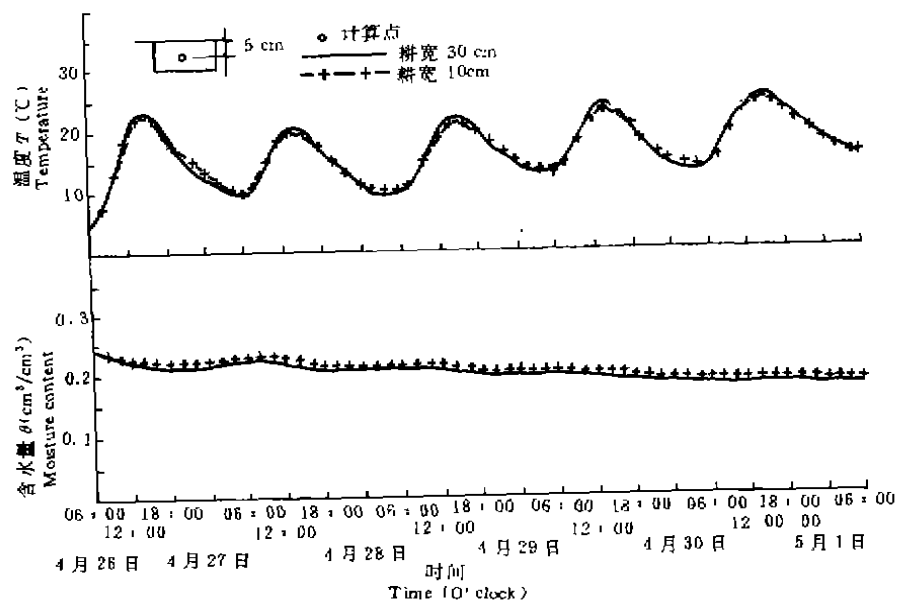


图 5 少耕对土壤水分与温度的影响

Fig. 5 The effect of minimum tillage on soil moisture and temperature

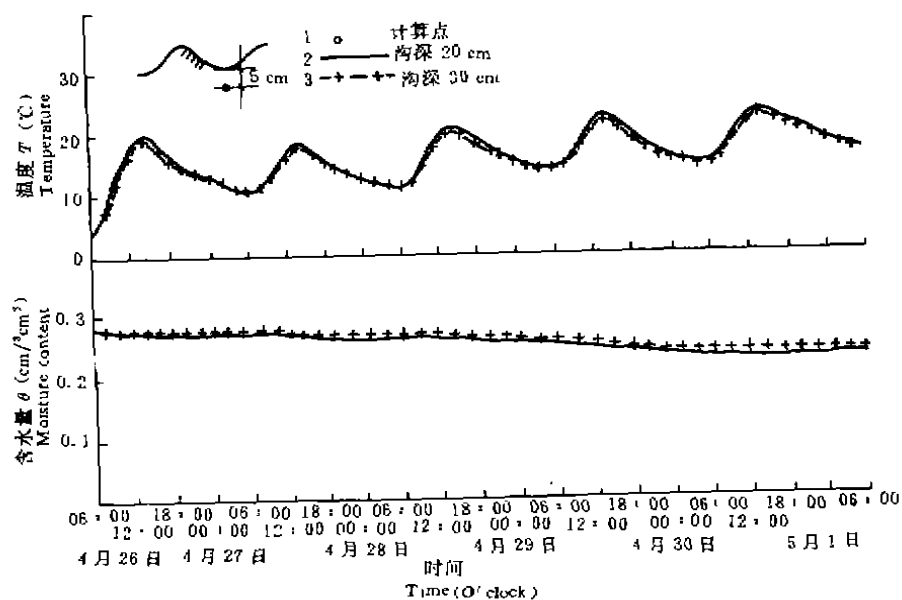


图 6 不同的沟深(垄高)对沟中 5 cm 处土壤温度与水分的影响

Fig. 6 The effect of ridge height on soil moisture and temperature

2.3.2 风向的影响 图 7 上图列出了不同风向对表面温度的影响。风垂直于沟走向时,沟中风的扰动小蒸发阻力大而蒸发率小,因此蒸发消耗的能量少,土壤的热通量增加,使地表温度最大增加了 4°C 。图 7 中图为不同风向对 5 cm 深度温度的影响。风垂直于沟走向时,沟中 5 cm 处地温高 1.8°C 。从图 7 可见,风向垂直于沟走向时,播种后第 5 d,沟中 5 cm 深处的水分比顺风沟高。

2.3.3 沟走向问题——东西向沟与南北向沟比较 图 8 上图列出了沟走向对表面温度的影响。南北向沟上午东坡温度高,下午西坡温度高。而计算点纬度为北纬 $36^{\circ}56'$,东西向沟南坡与沟底(沟不太深)总在日照之中,沟中温度与南坡温度一直比较高,上下午东西向沟沟中表面温度比南北向沟可高出 3°C 。图 8 下图列出了不同沟走向对 5 cm 深处地温的影响。东西向沟沟中 5 cm 处地温在上午与下午可高近 1°C 。由于初始土壤含水量较低,沟走向对水分的影响不如风向的影响显著。

3 应用实例

农业部课题“西北黄土高原耕作增产措施机械化研究”³⁾,其目的是要研究水平沟与垄沟种植的工艺指标,从而提出农机具配套系统设计方案³⁾。就是说,首先要决定开沟筑垄的农艺要求,才能设计配套机具。陕北春季干旱且气温低,春天玉米播种后能否出苗是关键,“能出苗就能收一半”。

3.1 输入资料:

输入气象资料见表 1。

总辐射要分解成散射辐射 R_s 与直接辐射 S_m ,然后按正弦函数分解成小时值。同样,气温与风速也按正弦函数分解成小时值,而平均相对湿度则按余弦函数分解成小时值。把标准气象资料换算成日变化值的方法参考文献¹⁾

(2) 土壤参数:土壤质量、土壤比重、土壤水分特征曲线、扩散率见参考文献[7]。

(3) 初始条件:开沟后 0~20 cm 含水量为 $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 100 cm 深处含水量为 0.22。温度分布也采用春播期间的实测值。

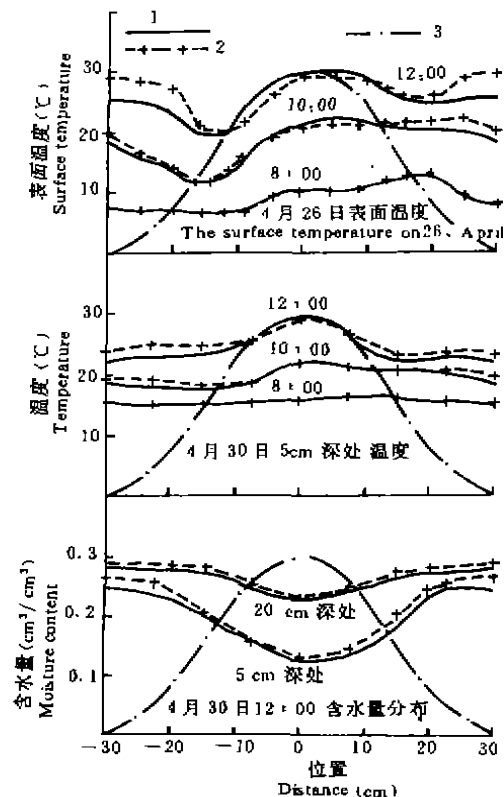


图 7 风向对垄沟土壤温度与水分的影响(南北向沟)

Fig. 7 The effect of wind direction on soil moisture and temperature

3) 林顺道, 杨邦杰等. 沟垄机械耕种技术, 西北黄土高原耕种增产措施机械化研究课题组技术报告, 延安农业机械总研究所, 1988.

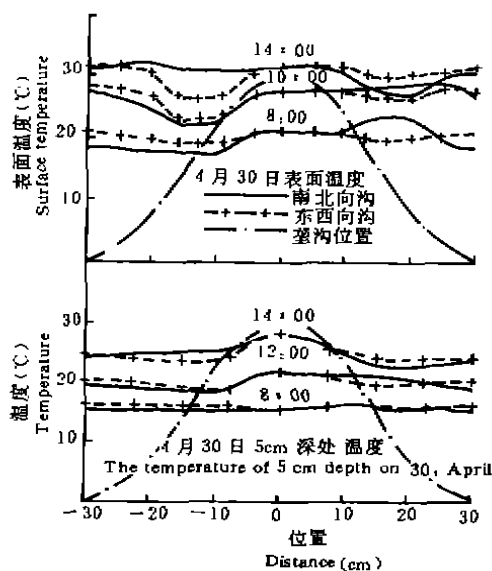


图 8 沟走向对土壤温度的影响

Fig. 8 The effect of furrow orientation on soil temperature

3.2 模拟分析沟种工艺指标

应用 SMT 分析

3.2.1 垄沟走向 由前面的分析可知, 沟走向应背风向阳, 与春季盛行风向垂直或成一角度。见图 9, 东西向沟由于背风向阳沟中 5 cm 深处地温比南北向顺风时高出 2.5°C (与初始水分含量有关), 含水量也高。

3.2.2 垄沟尺寸 玉米行距 60~80 cm, 用开沟犁容易形成宽 40 cm 深 20~40 cm 或宽 30 cm 深 15~30 cm 的垄沟。行距太小则沟浅, 而起不到明显的温度水分效应, 行距宽时垄沟可以加深, 但土地利用率太低。从图 10 列出了不同尺寸的背风向阳垄沟, 开沟后第 5 天沟中 5 cm 深处温度与含水量的比较。由图 10 可见, 太深的沟对温度不利, 而太浅的沟对水分不利。行距 80 cm 时, 垄沟宽 40 cm 深 30 cm 较好。谷子行距小, 可用一沟种几行的

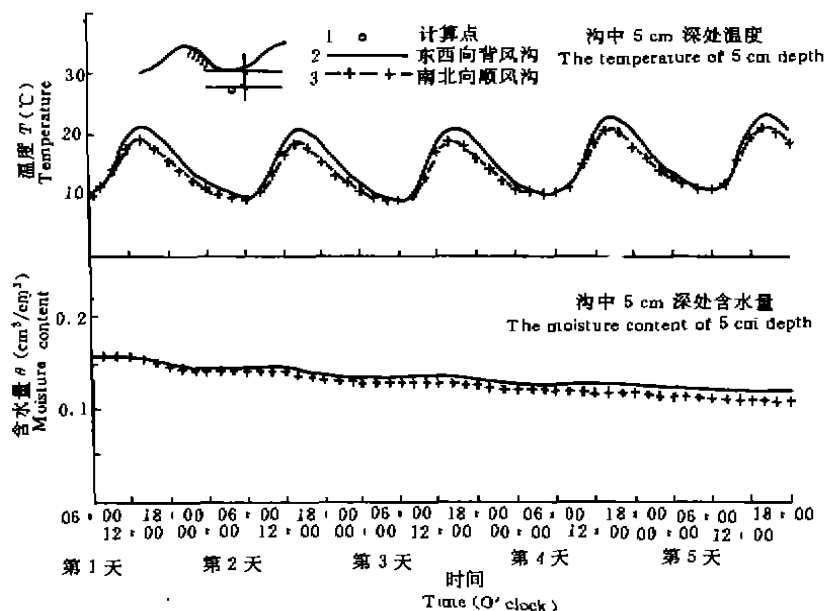


图 9 陕北春播期间不同的沟走向对沟中土壤温度与水分的影响

Fig. 9 The effect of furrow orientation on soil moisture and temperature in Northern China

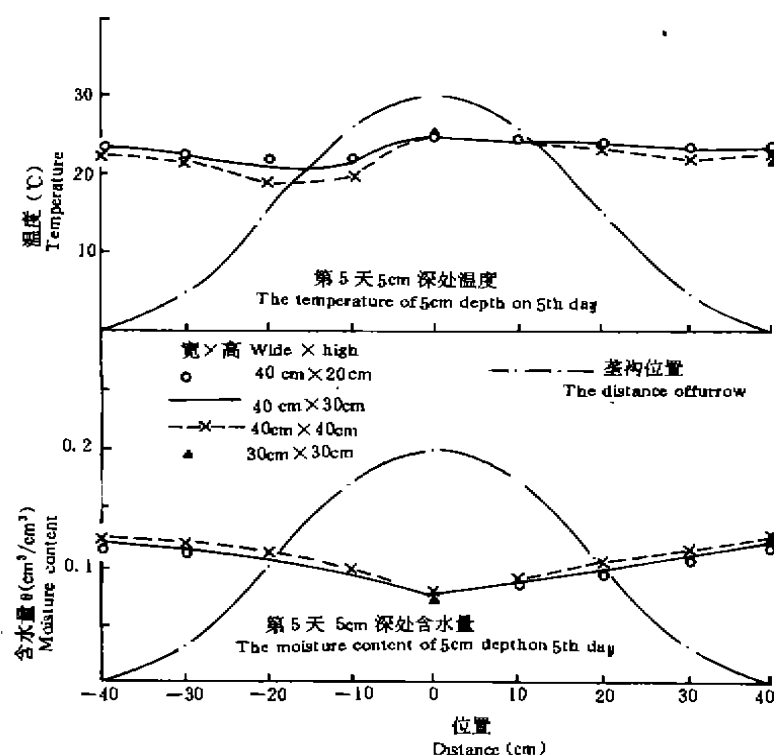


图 10 陕北春播期间不同尺寸的沟垄对土壤温度与水分的影响

Fig. 10 The effect of ridge dimensions on soil moisture and temperature in Northern China

办法,以便充分利用垄沟的温度与水分效应。

通过以上分析,田间试验可以在较小的范围内进行。

4 结论

4.1 种子发芽与出苗主要受土壤水分与温度的影响。耕作是对土壤生态系统的人工调控,目的是要为种子发芽与出苗提供适宜的环境。耕作措施对土壤水热传递过程的影响涉及到许多复杂的影响因素,模拟研究可对这一过程有深入的了解。

表 1 陕北春播期间的气象资料(日平均值)

Table 1 Daily average weather data during the spring sowing season in North-West China

天数 Days (d)	平均气温 Air temperature (°C)	风速 Wind speed (m/s)	相对湿度 Humidity (%)	总辐射强度月平均值 Monthly average globe radiation (W/m²)	风向 Wind direction
1	13.1	2.2	68	215.3	S/SE
2	13.3	2.5	51		
3	14.2	2.4	46		
4	17.0	2.8	47		
5	15.1	1.5	71		

4.2 作者在研究非均质土壤起伏不平的地表与大气间水分能量交换过程的数值分析方法的基础上,发展了耕作对土壤水热运动影响的基于有限元分析方法的数值模型。这一模拟分析程序能分析不同环境条件、不同耕作措施对土壤水分温度分布的影响,为耕作研究提供科学的依据,减少不必要的田间试验。

4.3 这一工作曾用于西北耕作研究,在西澳大利亚斥水土壤地区的耕作研究中也得到应用^[8],为农业生态学的研究提供了基于模型-模拟-优化的定量分析方法。

参 考 文 献

- 1 Hades A, Larson W E and Almaraz R R. Advances in modeling machine-soil-plant interactions. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11: 349~372
- 2 杨邦杰,曾德超,唐登银等.裸地蒸发过程的数值模拟. *地理学报*, 1988, 43(4): 352~362
- 3 杨邦杰,陈镜明.二维土壤蒸发过程的数值模型. *生态学报*, 1990, 10(4): 291~297
- 4 Chen J M, Yang B J. Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment. *Soil Science*, 1989, 148(6): 433~435
- 5 Philip J R and de Vries D A. Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients. *Trans. Am. Geophys. Union*, 1957, 38: 222~232
- 6 Van Bavel C H M and Hillel D I. Calculating Potential and Actual Evaporation from a Bare Soil Surface by Simulation of Concurrent Flow of Water and Heat. *Agric. Meteorol* 1976, 17: 453~476
- 7 中国科学院西北水土保持研究所.中国科学院西北水土保持研究所集刊.西安:陕西科学技术出版社,1985,第2集
- 8 杨邦杰,Blackwell P S, Nicholson D F. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施. *环境科学*, 1994, 15(4): 88~90