

斥水土壤中的水热运动规律与数值模型*

杨 邦 杰

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100080)

P. S. Blackwell and D. F. Nicholson

(西澳大利亚农业部)

摘 要

斥水土壤很难被雨水湿润,影响种子发芽出苗而造成农业减产。由于地表干燥而引起风蚀水蚀,造成土地退化。这一问题在澳大利亚、荷兰、新西兰与美国引起重视。斥水土壤中水分分布往往是无规律的“指状”,到目前为止,没有成功的数学模型。作者从研究斥水土壤地区的耕作工程实践出发,采用沟种之后,水分的分布就有了规律性。开沟播种时,耕作机械把表层斥水性特别强的土壤推到垄上而形成几乎不透水的垄,下雨时雨水只能从沟中渗入形成土壤中水分的规律性分布。不透水的垄还减少了水分的蒸发,提高了出苗率。根据这一规律性而建立了斥水土壤中水热运动的数值模型,为研究斥水土壤中的水热运动规律与斥水土壤地区耕作工程研究提供了新的思路与方法。

关键词 土壤斥水性, 土壤水热运动, 数值模型

土壤斥水性(Water repellency)是指水分很难湿润土壤颗粒表面的物理现象,具有斥水性的土壤称为斥水土壤(Water repellent soils)^[8]。把水珠滴在干燥的斥水土壤表面时,水珠停留在土壤表面长时间不能入渗(从>5秒到数小时)。下雨之后,往往只能湿润表层0.001—0.01m薄薄的一层土壤,或形成不规则入渗的水分“指状”分布。图1是在播种期间雨后测得的水分分布图。

澳大利亚某些土生的植物,以及一些牧草的枝叶在表土层中分解后形成斥水有机物,这些物质在土壤颗粒表面形成斥水层。另外,牧场上牲口不能消化的草料也会形成斥水有机物。砂粒比表面小,质地粗糙,容易形成斥水层。斥水性往往发生在砂土耕作层。这种斥水层类似某种蜡质,温度升高时,斥水性会降低以至消失。斥水性也随土壤湿度的增加而降低。严格地说,土壤斥水性的度量应由水与土壤固体颗粒之间的接触角大小而定。在实际应用中,一般用“滴水渗透时间”(WDPT—water drop penetration time)来描述。WDPT>5s则认为有斥水性,而WDPT>3600s为严重斥水性。这种方法可能相当

* 本项研究得到澳大利亚谷物研究与发展委员会的资助。Murdoch University, CSIRO旱地土壤与作物组提供了小气候测试仪器,西澳大利亚大学土壤物理实验室协助测定土壤参数,Grant Morrow与David Horwood协助进行田间试验,在此一并致谢。

收到修改稿日期:1995-09-03

费时间,实际应用时往往采用一定浓度的酒精溶液来代替水滴,称为MED法(the Molarity of an Ethanol Drop Test)^[2]。

土壤的斥水性严重影响出苗率,由于很难把种子正好播到湿土上而影响发芽出苗造成农业减产。由于斥水性,下雨时往往形成径流而发生水蚀。因为表层土壤总是干燥又易形成风蚀,从而造成土地退化。

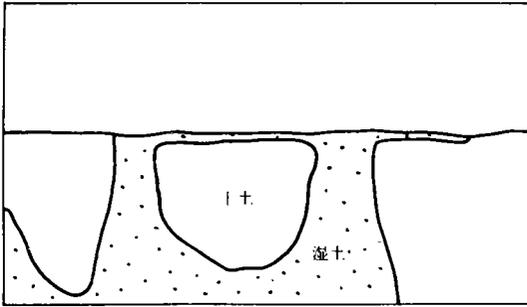


图1 雨后斥水土壤中的水分分布

Fig.1 Water distribution in water-repellent soil after raining

世界各地都发现斥水土壤。大约在120年前美国就注意到土壤的斥水性,荷兰约有75%农业土壤表层显示中等的或严重的斥水性,95%以上的自然表层土壤显示斥水性^[10]。澳大利亚与南澳大利亚大约有1/3耕地由于斥水性而减产,而且有逐年加重的现象。

二十多年来,研究人员一直在进行斥水土壤中水分运动的规律性研究,近年来在观察的基础上希望能建立数值模型以便了解其一般规律,但由于水分分布的随机性而没有实现^[5-10]。在西澳大利亚进行斥水土壤改良的研究中,作者根据在国内进行沟垄耕种的经验¹⁾,发现一旦采用沟种,水分在土壤中的分布具有强烈的规律性,不但提高出苗率,还发展了斥水土壤中水热运动的数值模型,并用于沟种设计分析。

1 斥水土壤中的水分分布规律与概念性模型

如图1所示:平作时,水分分布是无规律的。当我们采用沟种时,由于表层0.1m土

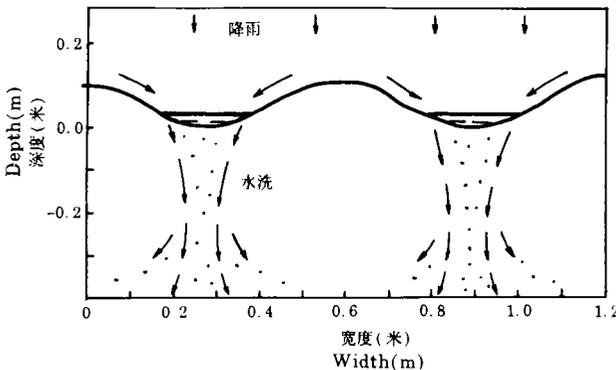


图2 沟垄上的降雨入渗过程

Fig.2 Infiltration on a ridge and in a furrow during raining

1) 林顺道,杨邦杰等:沟垄机械耕种技术,“西北黄土高原地区耕种增产措施机械化研究”组研究报告,延安农业机械研究所,1988。

壤斥水性特别强, 耕作机械把这一部分土推到了垄上而形成几乎不透水的垄。如图 2 所示, 降雨时只能湿润垄上 0.001—0.005m 表层, 水流入沟中而形成雨后土壤中水分的规律性分布(图 3), 其特点是在垄中形成一干土柱。只要水分布是有规律性的, 温度的分布也是有规律性的。

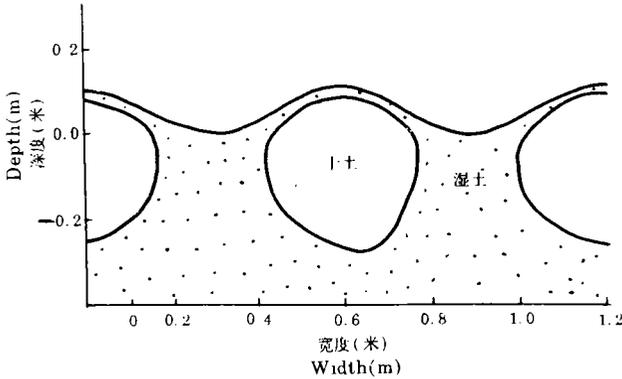


图 3 沟种时雨后土壤中的水分分布

Fig.3 Water distribution in a furrow-sown water repellent sand

2 数值模型

根据上述概念模型, 以及作者提出的沟垄中的水热运动模型的基础上^[11], 建立斥水土壤中的水热运动模型。

2.1 控制方程:

土壤中水热耦合运动规律可以用修改的 philip 方程描述^[1]:

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

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_L L \nabla \cdot (K_v \nabla \psi) \quad (2)$$

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

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

2.2 边界条件:

方程值(1)(2)在土壤大气界面上应满足的边界条件为:

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

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

n 为边界 (x,z) 处的去向, $E_s(m/s)$ 是时刻 t 边界 (x,z) 处的水汽通量(不下雨时为蒸发率)。

$$E_s(x,z,t) = \frac{H_s(x,z,T_s,t) - H_a(t)}{r_c(x,z,t) + r_s(x,z,t)} \quad (6)$$

其中 $H_s(kg/m^3)$ 是边界 (x,z) 处地表温度为 T_s 时的空气的绝对湿度, $H_a(kg/m^3)$ 是参考高度 Z 处的相对湿度, r_c 为修正的空气动力学阻力, 其计算方法见文献[1], r_s 是土壤表层的蒸发阻力, 设其可以用下面的经验函数表示:

$$r_s = -a + a(\theta_s / \theta)^b \quad (7)$$

其中 θ_s 为饱和含水量, θ 为表层土壤(0-0.01m)含水量, a 与 b 为田间试验所拟合的参数。

$S(W/m^2)$ 是时刻 t 边界 (x,z) 处的热通量, 要详细分析非均匀地面上的能量平衡来计算^[1], 而在土壤一定深度以固定的温度与水分作为边界条件。考虑到沟垄之间的水热交换, 在计算区两侧各增加一沟垄, 使其成为内部单元(图4)。

2.3 有限元解

方程组(1)-(5)可以用有限元法求解^[1]。空间离散所采用的网格如图4所示。其特殊性在于垄中有干土区是不透水的, 这是斥水土壤水热运动规律的特点。

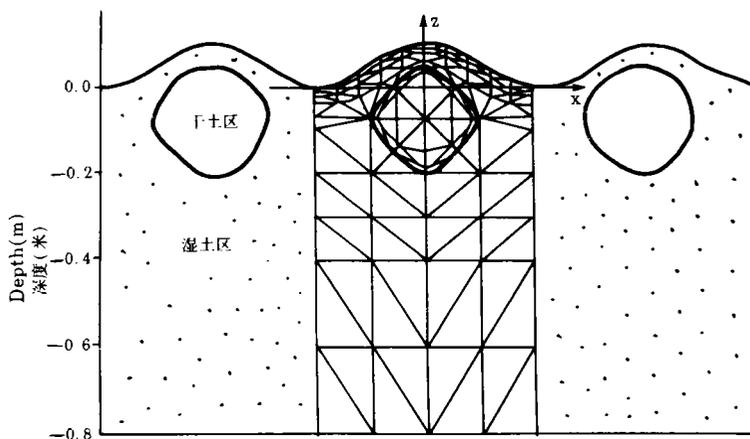


图4 有限元分析网格

Fig.4 finite element network used for the model

3 田间试验与模型的验证

1991年3月在西澳大利亚 Geraldton(北纬 $28^{\circ} 45'$, 东经 $170^{\circ} 10'$)进行了两次田间试验。第一次田间试验用于研究土壤表层的蒸发阻力, 第二次用于模型的校订与验证, 试验地土壤特性如表1所示。

3.1 实验1: 测定土壤表层的蒸发阻力

蒸发阻力测定与计算, 参考文献[4]。在田间设置了四个 $3m \times 3m$ 的样方, 进行四种不同的处理: (1)耕松并施加湿润剂; (2)耕松; (3)镇压并加湿润剂; (4)镇压。湿润剂是一种化学品, 可以去除斥水性, 但成本太高。这四种选择是沟种时可能的组合方式。模拟人工降雨使土壤耕层湿透后用塑料膜覆盖两日, 使水分分配均匀, 然后去掉覆盖使其自然蒸

表 1 实验地的土壤物理特性

Table 1 Physical properties of the soil

深度 Depth (m)	有机质 Organic matter (g / kg)	粘粒 Clay (%)	粉粒 Silt (%)	砂粒 Sand (%)	酒精溶液滴实验 MED*
0—0.15	9.1	1.95	1.45	96.6	3.0
0.15—0.5	1.9	1.4	0.8	97.8	0.1

* MED: Molarity of Ethanol Drop test.

发并测定以下参数(以下数据白天两小时采样一次,晚上 4 小时采样一次)。(1) 土壤水分: 0—0.01m 土壤含水量,取土样用烘干法测定。(2) 土壤温度: 表层温度用红外测温仪测定。(3) 蒸发率: 用小型 Lysimeter(0.15m 直径,深 0.3m)^[3]用称重法测定。(4) 气象数据: 空气温度、湿度、风速、辐射同步在田间测定。

根据以上数据,参考文献[4]的方法计算土壤表层的蒸发阻力并用公式(7)拟合成曲线(图 5)。

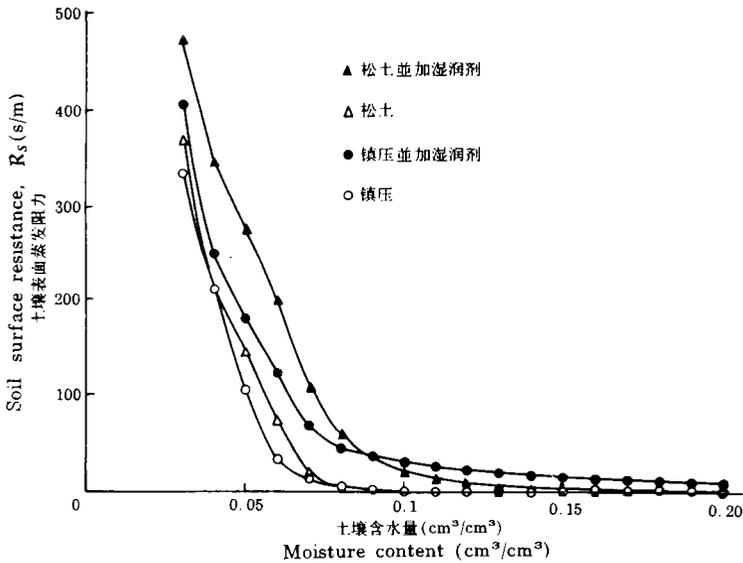


图 5 土壤表层的蒸发阻力

Fig.5 Soil surface evaporation resistance

3.2 实验 2: 模型验证实验

在上述同一田块中,在 50m×50m 的区域内作出南北向沟垄,沟距 0.6m,垄高 0.1m。模拟降雨后蒸发(1991 年 3 月 26—28 日)。以下参数白天每 2 小时记录一次,晚上 4 小时记录一次。(1) 土壤水分: 沟中与垄上 0—0.01,0.04,0.1,0.2m,每两小时取土一次; 0.3,0.4,0.6,0.8m 每日取土一次用烘干法测定。(2) 土壤温度: 土壤表面温度用红外测温仪测定,0.04,0.1,0.2,0.3,0.4,0.6,0.8m 用传感器自动记录。(3) 蒸发量: 沟中的蒸发率用 Lysimeter 测定(同实验 1)(4) 小气候数据: 测定方法同实验 1。

3.3 土壤参数

土壤水分特征曲线用压力膜在西澳大利亚大学测定(图6),土壤导水率是根据实测的扩散率计算的(图7),热参数可以根据土壤的物理特性计算^[1],比较特殊的是假定在垄中的干土区导水率为0,但导热率并不为0。

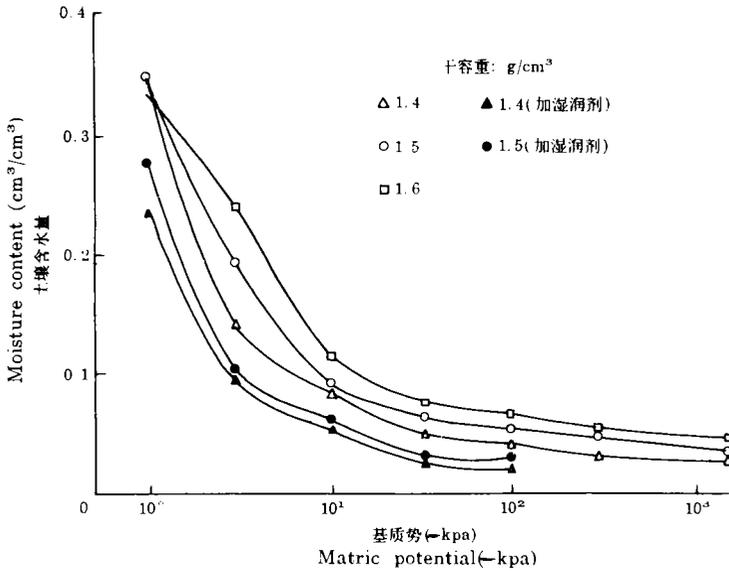


图6 土壤水分特征曲线

Fig.6 Soil moisture characteristics

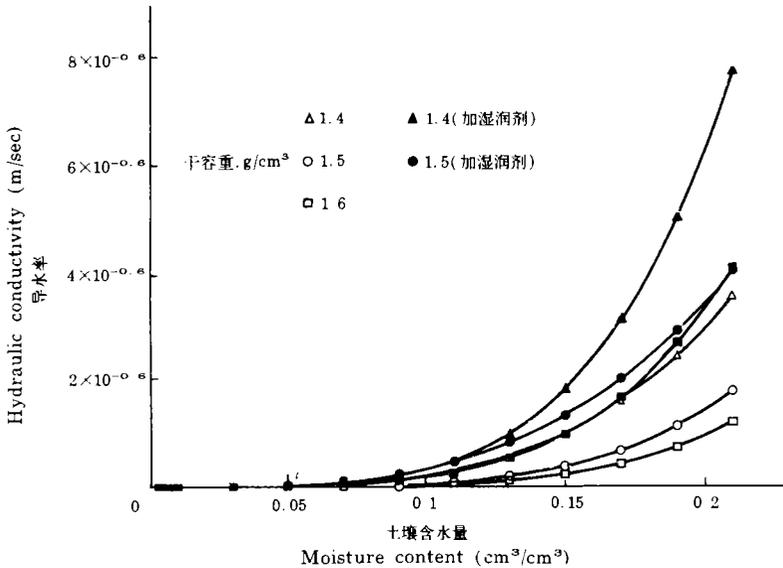


图7 土壤导水率

Fig.7 Soil hydraulic conductivity

3.4 模型的验证

土壤温度与水分的初值是实测的, 输入数据包括实测的小气候数据与土壤参数。时间步长为 10 分钟。

图 8 是实测的与计算的沟中与垄上温度值比较。

图 9 是实测的与计算的沟中蒸发率与累结蒸发率的比较。

图 10 是实测的与计算的沟中 0.04m(播种深度)深处水分的比较。其吻合程度不如

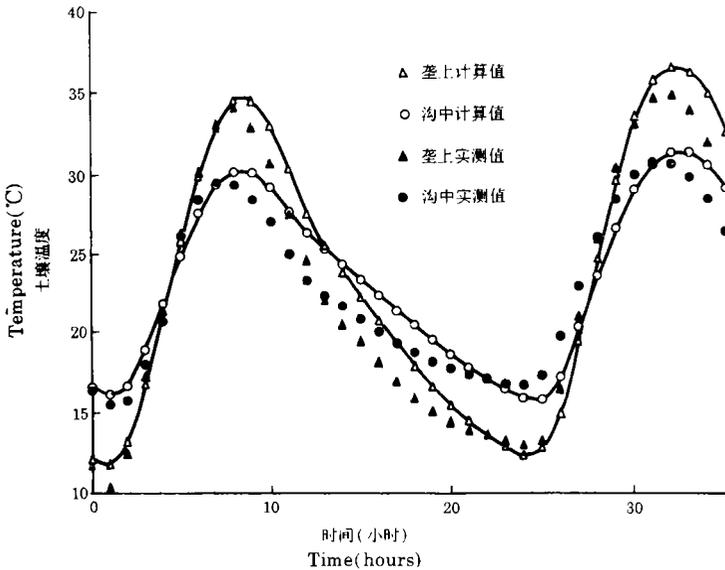


图 8 实测的与计算的沟中与垄上 0.04m 深处温度值比较

Fig.8 Measured and predicted soil temperature at 0.04m depth in the ridge and furrow

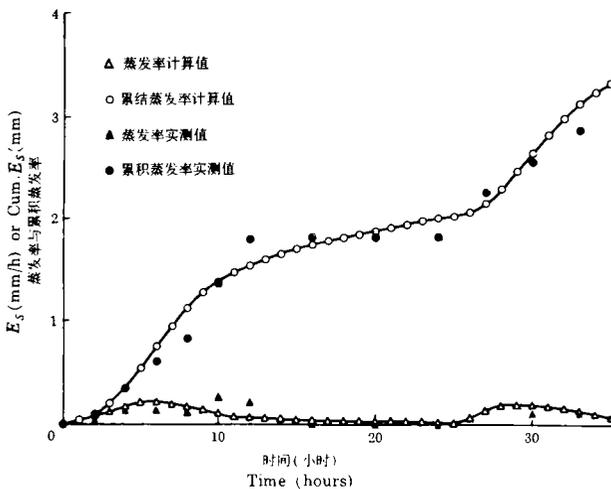


图 9 实测的与计算的沟中蒸发率与累结蒸发率的比较

Fig.9 Measured and predicted the evaporation rate and cumulative evaporation in the furrow

温度。这是因为(1)砂土含水量低;(2)烘干法精度也低。因此,虽然相对误差较大,但绝对误差小(<1%)。0.2m以下水分与温度日变化太小而没有列出。从图上可以看出,模型能比较好地反映实际情况。

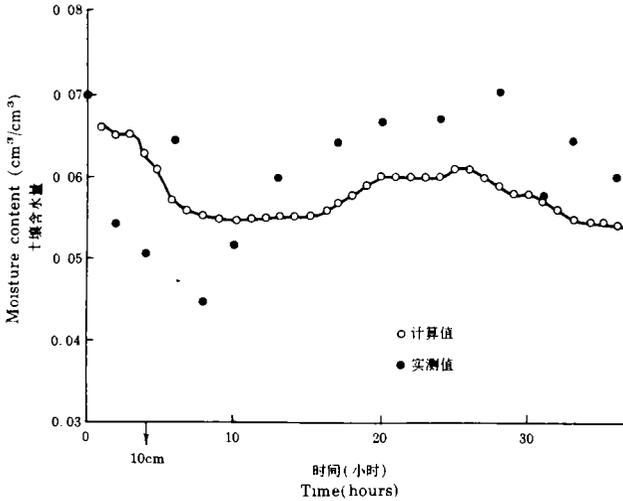


图 10 实测的与计算的沟中 0.04m(播种深度)深处水分的比较

Fig.10 Measured and predicted soil moisture content at 0.04m depth in the furrow

4 结论

1. 斥水土壤中水分的分布是不均匀的,无一定的规律可循。迄今为止没有成功的数学模型。作者从耕种工程研究的实际出发,采用沟种之后,不但有利于种子发芽出苗,而且使水分运动具有明显的规律性。从而建立了数值模型。

2. 通过田间试验测定了土壤表层的蒸发阻力,并对数值模型进行了校正与验证。以使用于耕种研究。

参 考 文 献

1. 杨邦杰,1989.土壤蒸发过程的数值模型及其应用. 学术书刊出版社,北京.
2. 杨邦杰,1994.土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究. 环境科学, 15(4): 88—90.
3. Boast C. W. 1986: Evaporation from bare soil measured with high spacial resolution. In: Klute A. (ed.), 1986: Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America. Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, USA.
4. Camillo P. J. and Gurney R. J., 1986: A resistance parameter for bare-soil evaporation models. Soil Science, 144(2): 95—105.
5. DeBano L. F. and Letey J. (eds.) 1969: Proceedings of the Symposium on Water Repellent Soils. University of California, Riverside, USA.
6. Dekker L. W. and Ritsema J., 1994: How water moves in a water repellent sandy soil, 1. Potential and actual

- water repellency. *Water Resources Research*, 30 (9): 2507—2517.
7. Dekker L. W. and Ritsema J., 1994: How water moves in a water repellent sandy soil. 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research*, 30 (9): 2519—2531.
 8. McGhie, D. A., 1983: Water repellent soils on farms. Farmnote No. 117 / 83 Western Australian Dept. of Agriculture.
 9. Wallis M. G., Horne D. J. and McAuliffe K. W., 1990: A study of water repellency. *New Zealand J. of Agri. Research*, 33: 139—144.
 10. Van Dam J. C., Hendrickx J. M. H., van Ommen H. C., van Genuchten M. Th. and Dekker L. W., 1990: Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *J. of Hydrology*, 120: 359—379
 11. Yang Bangjie, Zeng Dechao, 1988: Simulation of seedbed soil moisture and temperature behaviour as affected by tillage operations. Proc. 11th International Conference. Soil and Tillage Research Organization, Edinburgh, Scotland. Vol. 1: 433—438.

MODELING HEAT AND WATER MOVEMENT IN A WATER-REPELLENT SANDY SOIL

Yang Bangjie

(*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

P. S. Blackwell and D. F. Nicholson

(*Western Australian Department of Agriculture, WA 6530, Australia*)

Summary

Water-repellent soils are difficult to wet and cause crop production losses and land erosion by wind and runoff. Research programs on soil water repellency have been conducted in Australia, the Netherlands, New Zealand and America for many years. Because wetting patterns in water-repellent soils are quite irregular and incomplete, there has been no successful model for heat and water movement in water-repellent soils. Based on our tillage research work in water-repellent soils in Western Australia, the water movement in furrow sown water-repellent sandy soils is quite regular. As making furrows, the extremely water-repellent surface soils are moved to form the ridges with dry cores. This leads to rainfall runoff from the ridge and infiltration into furrow. Furrow tillage not only increased the germination, but also make it possible to develop a model. A numerical model of heat and water movement in furrow sown water-repellent sand was developed and validated by the authors in Western Australia in 1991.

Key words Soil water repellency, Soil heat and water, Numerical model