

棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律数值模拟^①虎胆·吐马尔白¹, 吴争光¹, 苏里坦², 牟洪臣¹

(1 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 通过棉花桶栽试验, 获取棉花全生育期土壤蒸发蒸腾量以及土壤含水率、含盐量变化规律。以土壤水分运动基本方程和溶质运移对流-弥散方程为基础, 在考虑棉花根系吸水和土壤蒸发蒸腾条件下, 对膜下滴灌棉花全生育期时段内土壤中水盐运移规律进行了数值模拟, 并与实测的土壤含水率和含盐量进行了对比分析。其结果显示: 土壤表层和深层的土壤含水率和含盐量模拟值与实测值均存在不同程度的偏差, 而中间层土壤含水率和含盐量的模拟值较接近实测值。因此, 只要能够获得足够的精确的大田实测资料, 就可以将该模型应用于棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律的实际预测。

关键词: 膜下滴灌; 水盐运移; 数值模拟; 根系吸水模型

中图分类号: S156.4[†]1

新疆水资源紧缺, 棉花的种植面积大, 耕地多为盐碱地, 灌水方式大多采用膜下滴灌。因此, 研究土壤中水盐运移规律对于农民节水灌溉、增产增收尤为重要。目前, 很多国内学者针对新疆特殊的气候条件、土质和种植模式, 采用实测的方法研究了膜下滴灌土壤中水盐运移规律^[1-4], 获取了大量的水分盐分数据资料, 为新疆膜下滴灌的推广起到了很好的指导性作用。但是, 试验的周期长, 取样点多, 工作量相当大, 比较费时费力。文献^[5-7]的研究表明, HYDRUS 模型可以用来模拟土壤中水盐运移规律。本文通过室内试验确定了土壤水盐运移参数, 以 HYDRUS 模型为基础, 建立了适合该地区的数学模型。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年 4 月—9 月在新疆农业大学室外试

验地进行, 采用桶栽棉花进行试验。试验用土取自新疆 121 团, 土壤为砂壤土, 初始含盐量为 19.6 g/kg, 装土前将土捣碎, 过 5 mm 筛子, 分 10 cm 装一层, 测定其体积质量为 1.32 g/cm³, 桶上覆盖地膜。灌溉定额为 3 900 m³/hm², 灌水次数为 16 次, 水量分配如表 1, 采用马氏瓶供水, 用医疗输液管替代滴头, 滴头紧靠棉株, 灌水时测定滴头流量并记录灌水时间, 每次灌水前后, 在距离滴头 10 cm 处取样, 取完后再回填原土样, 下次再换一个点取样, 每个土样代表 5 cm 深度, 测定其土壤含水率和含盐量, 取土后将桶称重, 至下次取土前再称重, 用以计算蒸发蒸腾量。

1.2 数学模型

1.2.1 土壤水分运移模型 采用膜下滴灌时, 土壤中水分入渗属于三维运动, 但是, 该试验中桶装土是均质、各向同性的, 则水分运动可以简化为轴对称的二维流动问题来处理。此时, 土壤中水分运动方程可表示为^[8]:

表 1 水量分配方案

Table 1 Water distribution scheme

项目	出苗水	苗期	蕾期	花期	铃期	吐絮期	合计
灌水比重 (%)	2	9	21	30	26	12	100
灌水次数	1	3	4	3	3	2	16
灌水时间	4 月 30 日	5 月 6 日 5 月 19 日 5 月 28 日	6 月 6 日 6 月 23 日 7 月 1 日 7 月 9 日	7 月 16 日 7 月 22 日 8 月 2 日	8 月 7 日 8 月 17 日 8 月 25 日	9 月 1 日 9 月 9 日	

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (51069015)、自治区“十二五”重大专项 (201130103-3) 和新疆水利水电工程重点学科项目资助。

作者简介: 虎胆·吐马尔白 (1961—), 男, 新疆博乐人, 博士, 教授, 研究方向为地下水土壤水盐运移理论及节水灌溉理论。E-mail: hudant@hotmail.com

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - s \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水率 (cm^3/cm^3); t 为时间 (d); r 为径向坐标 (cm); h 为土壤负压水头 (cm); $K(h)$ 为非饱和土壤导水率 (cm/d); z 为垂向坐标 (cm); s 为根系吸水项 ($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$).

1.2.2 土壤溶质运移模型 在轴对称条件下, 溶质运移的控制方程为^[9]:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho s)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_r \theta \frac{\partial c}{\partial r} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_c) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \theta \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q_z c) - \mu c \quad (2)$$

式中, c 为土壤溶液中盐分浓度 (g/kg); D 为水动力弥散系数 (cm^2/d); q 是土壤水分运动通量 (cm/d); 下标 r 和 z 分别表示径向和垂向 (cm); ρ 为土壤干体积质量 (g/cm^3); s 为土壤固相中盐分含量 (g/kg); μ 为降解速率常数 (1/d).

1.2.3 根系分布模型 由于土壤是均质、各向同性的, 且灌水时, 滴头紧靠棉株, 故可以将棉花根系吸水看作是均匀的, 其根系在垂向上是关于主根成对称分布的, 所以根系分布函数采用 Vogel^[10-11]模型, 其方程为:

$$b(x, z) = \left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \left(1 - \frac{x}{x_m} \right) e^{-\left[\frac{p_x}{z_m} |z^* - z| + \frac{p_z}{x_m} |x^* - x| \right]} \quad (3)$$

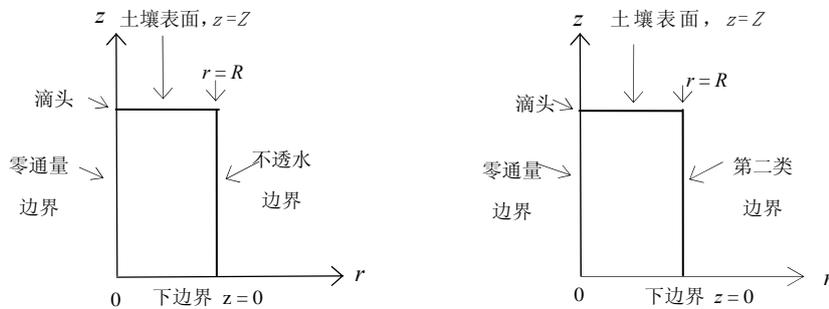


图 1 区域边界条件

Fig. 1 Regional boundary conditions

试验中滴头流量的变化范围在 0.4 ~ 0.6 L/h 之间, 灌水过程中土体表面不存在积水现象, 且土体表面覆盖地膜, 土壤水分蒸发量特别小, 可以忽略不计, 故将每次计算的水分减少量全部视为蒸腾量, 将上边界条件视为第二类边界:

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = -E(t) \quad r > R_s, \quad z = Z, \quad t > 0 \quad (5)$$

式中, $D(\theta)$ 为土壤扩散率 (cm^2/d); $E(t)$ 为蒸腾量 (模型中视为正值) (cm/d).

研究区域的左边界是过滴头的垂直面, 故将其视

式中, $b(x, z)$ 为根系密度函数 ($1/\text{cm}^2$); x 和 z 分别表示水平 (径向) 和垂向 (cm); x_m 为水平向最大根长 (cm); z_m 为垂向最大根长 (cm); x^* 为水平向最大根密度的半径 (cm); z^* 为垂向最大根密度的深度 (cm); p_x 和 p_z 为经验系数; 当 $x > x^*$ 时, p_x 为 0, 当 $z > z^*$ 时, p_z 为 0.

1.3 模型计算

在土壤均质、各向同性条件下, 滴灌是以滴头为中心, 水分入渗在空间是对称的三维运动, 并且根系分布也是对称的, 故选择过滴头的垂直剖面为模型模拟区域, 计算区域为矩形, 宽 (径向) 25 cm, 长 (垂向) 60 cm. 采用矩形网格 ($0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$) 剖分. 模拟时段为棉花整个生育期, 历时 150 天, 采用变时间步长计算: 初始时间步长为 0.001 d, 最小和最大时间步长分别为 0.0001 d 和 1 d.

1.3.1 土壤水分运动初始及边界条件 假定桶装土的初始含水率在研究区域是均匀分布的, 初始条件可以表示为:

$$\theta(r, z) = \theta_0 \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t = 0 \quad (4)$$

式中, θ_0 为土壤初始含水率 (cm^3/cm^3); R 和 Z 分别为模拟区域边界在径向和垂直方向的坐标, 如图 1.

为零通量边界:

$$D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = K(\theta) \quad r = 0, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t > 0 \quad (6)$$

右边界和下边界均视为不透水边界:

$$D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = K(\theta) \quad r = R, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t > 0 \quad (7)$$

$$D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = K(\theta) \quad 0 \leq r \leq R, \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (8)$$

1.3.2 溶质运移初始及边界条件 假定桶装土的初始盐分含量在研究区域是均匀分布的, 初始条件可

以表示为：

$$C(r, z) = c_0 \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t = 0 \quad (9)$$

式中， C_0 为土壤初始含盐量 (g/kg)。

由于土壤表层的水分减少量可以由植株蒸腾量表示，故将溶质运移的上边界视为第三类边界条件：

$$D \frac{\partial c}{\partial z} + cE(t) = 0 \quad 0 \leq r \leq R, \quad z = Z, \quad t > 0 \quad (10)$$

研究区域溶质运移的左边界可视为零通量边界：

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad r = 0, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t > 0 \quad (11)$$

下边界、右边界与外界隔断，故将溶质运移的边界条件视为第二类边界条件：

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad 0 \leq r \leq R, \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial r} = 0 \quad r = R, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad t > 0 \quad (13)$$

1.3.3 模型参数 土壤水分运动参数采用室内试验^[12]测定，并采用 Van Genuchten 模型^[13]对土壤水分特征曲线进行拟合，土壤水分运动参数见表 2。

表 2 土壤水分运动参数

Table 2 Parameters of soil moisture movement

土壤质地	体积质量 γ (g/cm ³)	残余含水率 θ_r (cm ³ /cm ³)	饱和含水率 θ_s (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	渗透系数 K (cm/d)
砂壤土	1.32	0.071	0.393	0.059	1.48	31.44

溶质运移参数包括纵向弥散度系数 D_L ，横向弥散系数 D_T ，以及盐分在自由水体中的分子扩散系数 D_W ，由文献^[14-15]其值分别取 0.1 cm、0.001 cm、2.14 cm²/d。由于土壤中含水率较低且有机质含量少，故在数值模拟中不考虑水体运动、非平衡吸附的影响。

棉花的蒸发蒸腾量采用称重法计算，根系吸水项采用 Feddes 模型^[16]，对于棉花^[17]，模型中根水势参数 h_0 (作物厌氧点)， h_1 (最佳水分适宜点)， h_2 (最高潜在蒸腾速率时水分胁迫点)， h_3 (最低潜在蒸腾时水分胁迫点)， h_4 (作物凋萎点) 的取值分别为 -1, -2, -200, -500, -14 000 cm。 T_H (最高的潜在蒸腾速率)， T_L (最

低的潜在蒸腾速率) 分别为 0.5, 0.1 cm/d。

根据实测数据，棉花根系分布函数中 x_m ， z_m ， x^* ， z^* 取值分别为 14.5, 38.1, 8.0, 5.2 cm，经验系数 p_x 和 p_z 分别为 -3 和 11。

2 结果与分析

2.1 不同深度土壤含水率及含盐量计算值与实测值对比

将不同时间的土壤含水率及电导率模拟结果与实测值进行了比较，图 2 显示了灌水前后土壤含水率随土壤深度变化规律的模拟值与实测结果。

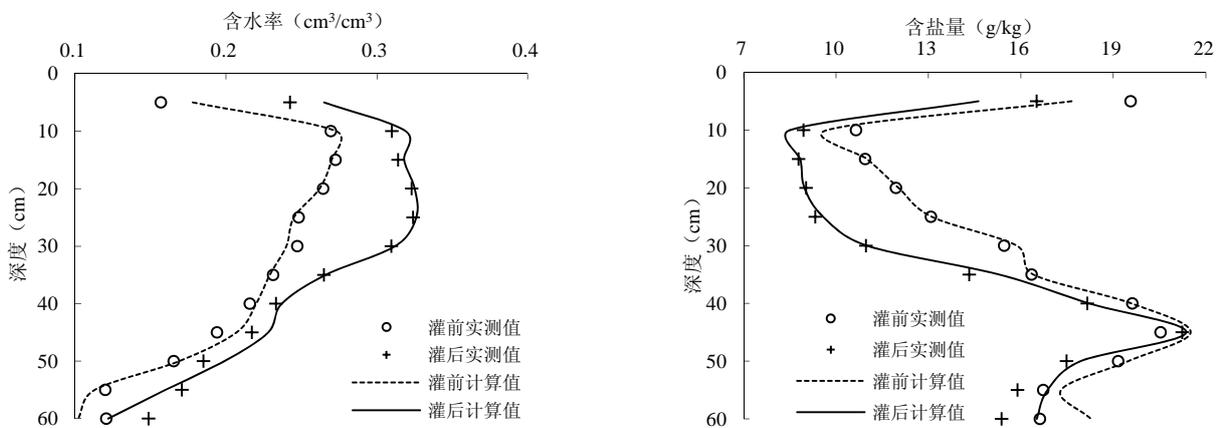


图 2 不同深度土壤含水率及含盐量计算值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of calculated and measured soil moistures and salt contents at different depths

由图 2 可知, 灌水前后, 土壤的含水率随深度的变化形状曲线基本保持一致, 只是同一深度的土壤含水率有所提高。在棉花的生育前期, 灌水定额较小, 深层的土壤含水率均较小, 随着棉花的生长, 滴灌的水量增加, 水分渗漏到桶底, 由于完全隔断了水分向外界的入渗, 深层土壤的含水率均较高, 土壤含水率只在浅层土壤发生变化。

不同深度土壤含水率模拟值与实测值吻合较好, 但土壤表层含水率实测值低于模拟值, 而 60 cm 处土壤含水率实测值要高于模拟值, 土壤中间层含水率的数值模拟精度最高。产生偏差的主要原因是, 模拟过程中视模拟区的上边界为零通量边界, 而且在考虑土壤腾发量时, 是以灌水后称重与下次灌水前重量之差来计算, 忽略了灌水过程中水分的蒸发蒸腾量, 故造成土壤表层含水率模拟值与实测值之间的差异。由于棉花主根长度为 38.1 cm, 较短时间间隔内深层土壤水很少被根系吸收, 也不能向下渗漏, 在重力作用下水分逐渐积累, 导致了实测值比模拟值大。

不同深度土壤含盐量的计算值与实测值的对比, 计算值和实测值均显示出, 灌水后表层土壤的含盐量要比灌前小, 土壤深度增加时, 灌水前后土壤的含盐量变化不同, 这主要是与灌水量的大小有关, 棉花生长初期, 根系较浅, 水分蒸发蒸腾量较小, 灌水量也较小; 生长后期, 随根系生长较快和蒸腾量增大, 灌水量逐渐增大。灌水量大时, 对土壤中盐分淋洗充分,

盐分向深层土壤运移较多, 故土壤的含盐量随土壤深度增加而增大。相反, 灌水量较小时, 盐分运移速率小, 积累在一定深度处, 故最深层土壤处的含盐量并不是最大的。

从对比结果可知, 表层土壤含盐量实测值比计算值要大, 土壤 60 cm 处含盐量实测值比计算值要小, 这与含水率的变化刚好相反, 而土壤中间层的含盐量的实测值和模拟值吻合良好。除了影响土壤含水率变化的因素间接地影响了土壤含盐量的变化, 土壤溶质运移参数和实测含盐量的精确程度也会造成计算值和实测值的差异。

2.2 不同时间土壤含水率及含盐量计算值与实测值对比

图 3 为棉花全生育期内, 10、30、50 cm 深度土壤含水率的变化规律。土壤深度越小, 土壤含水率在棉花生育期内波动越频繁, 含水率的变化时间主要集中在 7、8 月份, 其主要原因是 7、8 月份气温高, 蒸发蒸腾条件下土壤中水分消耗速率非常快, 棉花又处在生长关键时期, 也需要吸收大量水分, 灌水后土壤含水率又迅速增大, 而且离滴头越近, 入渗水量越多。

从整体情况看, 10 cm、50 cm 深度土壤含水率的计算值与实测值的吻合程度不如 30 cm 深度好。这主要是因为模型中的上边界条件和下边界条件与实际情况相比, 还是有细微区别, 实际的边界条件比模型中设计的要复杂, 而且实测的蒸腾量也是存在一定误差的。

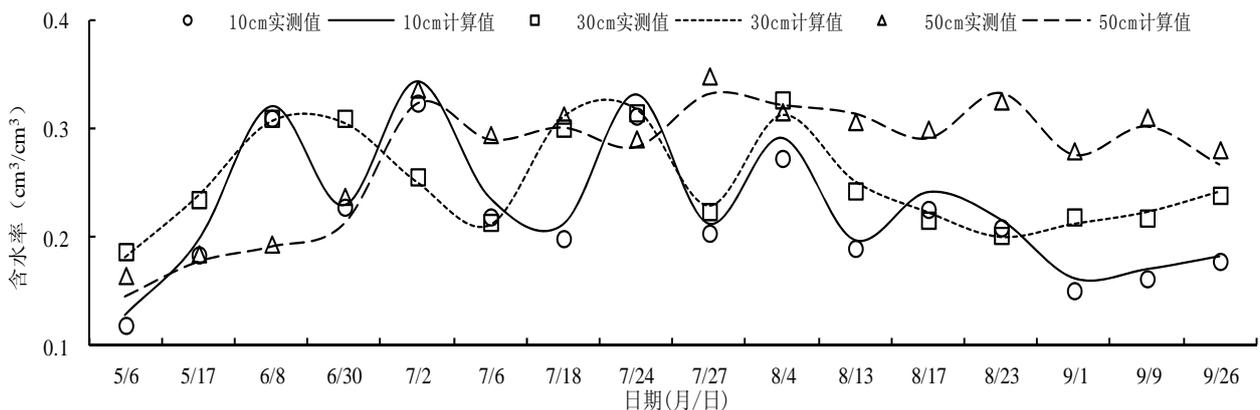


图 3 棉花全生育期土壤含水率计算值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of calculated and measured soil moistures during whole stages of cotton

图 4 为棉花全生育期内, 10、30、50 cm 深度土壤含盐量的变化规律。在棉花的整个生育期内, 10 cm 深度土壤含盐量都较低, 但是起伏变化较为频繁, 其次是 30 cm 深度处, 而 50 cm 深度的土壤含盐

量一直保持较高水平, 这主要是土壤中盐分在滴灌水淋洗作用下, 逐渐向深层土壤运移, 而桶的四周与外界阻隔, 盐分在深层土壤逐渐积累, 其含量也越高。

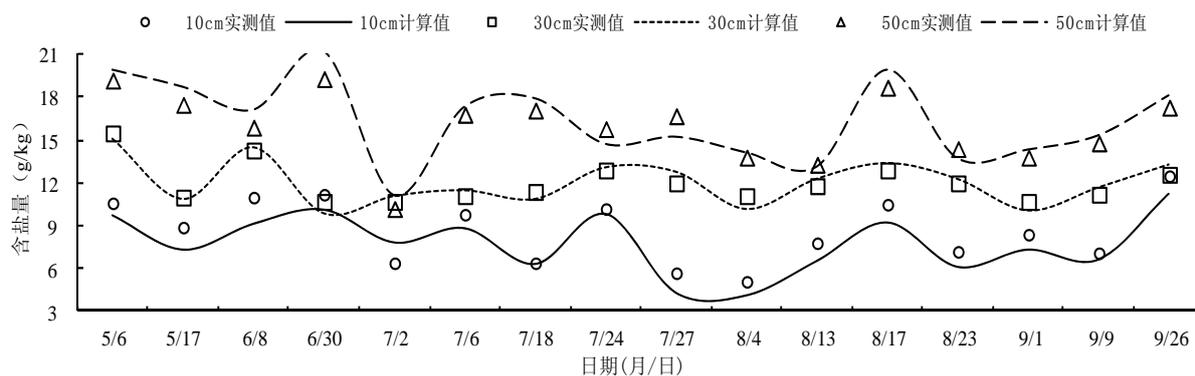


图4 棉花全生育期土壤含盐量计算值与测值的比较

Fig. 4 Comparison of calculated and measured soil salt contents during whole stages of cotton

整个生育期内, 土壤含盐量的实测值变化趋势与计算值的变化趋势基本一致, 但是 10 cm 深度土壤含盐量的实测值要略高于计算值, 50 cm 深度土壤含盐量的实测值与计算值也有细微差别, 30 cm 深度的土壤含盐量实测值与计算值吻合最好。

3 结论与建议

(1) 通过室内外试验分析确定的数学模型计算的土壤含水率、含盐量与实测值吻合较好, 变化趋势基本一致。由于实际的上边界和下边界条件较复杂, 模型模拟过程与实际情况还是有细微差异, 致使土壤表层和深层的土壤含水率和含盐量的计算值与实测值还存在一定偏差, 但是 30 cm 处土壤的含水率和含盐量的计算值与实测值吻合程度均相当好。

(2) 由于本文是采用桶栽棉花进行试验, 试验过程中完全阻隔了土壤中水分、盐分向外界扩散, 其边界条件与大田的实际情况还是有所不同的, 对于土壤表面覆膜带来的增温保温效应以及土壤中盐分的吸附和交换, 土壤水盐运移模型中也没有单独考虑土壤的温度变化和矿化等化学反应。综合考虑上述影响因素, 膜下滴灌条件下水盐运移模拟模型还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 朱友娟, 郑德明, 姜益娟. 新疆棉田膜下滴灌方式下土壤水分运移变化规律研究. 新疆农业科学, 2007, 44(5): 613-618

[2] 张琼, 李光永, 柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响. 水利学报, 2004(9): 123-126

[3] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 汪志荣, 张建丰. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54-57

[4] 万素梅, 胡守林, 翟云龙. 膜下滴灌棉花土壤水分动态变化研究. 水土保持研究, 2007, 14(1): 90-91

[5] 胡克林, 肖新华, 李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农

田水分渗漏的影响. 水科学进展, 2006, 17(5): 665-670

- [6] 毛萌, 任理. 有效参数的幂平均算法对农田尺度阿特拉津淋溶动态数值模拟的影响. 水科学进展, 2005, 16(2): 222-232
- [7] 虎胆·吐马尔白, 王薇, 孟杰, 马英杰. 作物生长条件下沙拉塔纳农田水盐耦合运移模型. 新疆农业大学学报, 2008, 31(1): 93-96
- [8] Sharmasarkar FC, Sharmasarkar S, Zhang RD, Vance GF, Miller SD, Rdddy MJ. Modeling nitrate movement in sugarbeet soils under flood and drip irrigation. J.ICID Journal, 2000, 49(1): 43-54
- [9] Omary M, Ligon JT. Three-dimensional movement of water and pesticide from trickle irrigation: Finite element model. Transactions of the ASAE, 1992, 35(3): 811-821
- [10] Vrugt JA, Hopmans JW, ŠIMUNEK J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1 027-1 037
- [11] Vrugt JA, van Wijk MT, Hopmans JW, Šimunek J. One, two, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. Water Resour. Res., 2001, 37(10): 2 457-2 470
- [12] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [13] Van Genuchten MTH. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 892-898
- [14] 马军花, 任理. 考虑水力学和矿化参数空间变异下土壤水氮运移的数值分析. 水利学报, 2005, 36(9): 1 067-1 076
- [15] 李久生, 张建君, 饶敏杰. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证. 水利学报, 2005, 36(8): 932-938
- [16] Feddes RA, Kowalik P. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. Journal of Hydrology, 1976, 31: 13-26
- [17] 王伟, 李光永, 傅臣家, 曾德超. 棉花苗期滴灌水盐运移数值模拟及试验验证. 灌溉排水学报, 2009, 28(1): 32-36

Numerical Simulation of Soil Water-salt Movement on Drip Irrigation Cotton Under Film

HUDAN·Tumarbay¹, WU Zheng-guang¹, SU Litan², MU Hong-chen¹

(1 *School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;*

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: This study determined the changes of soil evapotranspiration, water content and soil salt through the growth stage of cotton planted in plastic barrel. Based on the equations of soil water movement and convection-dispersion of solute transport, HYDRUS-2D software was used to simulate the rules of soil water and salt transports on condition taking into account cotton root water uptake and soil evapotranspiration, the simulated and measured values were compared of soil moistures and salt contents. The results showed that the simulated and measured values of soil moistures and salt contents were different both in the surface and deep layers, but were close in the middle layer. Thus, HYDRUS-2D software can be used to forecast soil water and salt transports under mulch drip irrigation when sufficient observed data are obtained in cotton field.

Key words: Drip irrigation under mulch, Water-salt movement, Numerical simulation, Root water uptake model