

# 畦灌施肥条件下地表水流溶质运移模型研究

李志新, 许迪, 李益农

(国家节水灌溉工程技术研究中心, 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 以零惯性量模型作为畦灌施肥水流模型, 一维的对流扩散方程 ADE 作为地表溶质运移方程, 分别采用隐式格式有限差和特征线法分别进行数值求解, 建立了畦灌施肥地表溶质运移模型, 并利用田间试验数据对模型进行了试验验证, 以期为实现畦灌施肥技术参数优化组合提供合理可行的模型工具。研究结果显示: 建立的畦灌施肥地表溶质运移模型是合理可行的, 可作为畦灌施肥技术要素优化组合的模拟工具。

**关键词:** 畦灌施肥; 水流; 溶质运移; 对流-弥散

**中图分类号:** S 275.3 S 153.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7601(2009) 01-0147-05

在农田生态系统中, 由于灌水施肥, 水肥向土壤深层的迁移, 特别是硝态氮的淋失对地下水环境造成很大的威胁。因此, 迫切需要研究田间水肥技术管理措施与水氮迁移之间的定量关系, 以提高水氮的利用率及防止环境污染<sup>[1]</sup>。

近年来, 国内外学者对灌溉排水条件下农田土壤水肥运移规律, 进行了深入而系统的研究。研究重点主要在两方面: 一方面, 在作物整个生育期内, 探讨灌溉制度及其它田间管理措施对农田土壤氮素分布的影响; 另一方面, 仅在灌水时段内, 探讨灌水或施肥技术要素对土壤水氮分布的影响。

后者的研究与灌水施肥技术密不可分。灌水施肥是指将肥液与灌水混合, 肥随水走, 施肥与灌水相结合的灌水及施肥方法。在国内, 灌水施肥技术主要还是应用在滴灌, 因而相关研究也较多<sup>[2,3]</sup>; 而畦灌施肥技术应用却较少。畦灌施肥是在畦首注入肥液, 通过畦灌的水流来运送、施用肥料至整个农田施肥与畦灌相结合的新技术, 具有成本低廉、灵活高效的优势, 在国外已得到重视和推广<sup>[4~9]</sup>。在我国, 畦灌技术使用非常普遍, 畦灌施肥技术在灌溉作物生产系统中具有极大应用潜力。但实践和研究发现, 当灌水施肥技术要素设计和控制不当时, 仍可能产生肥料分布不均或深层渗漏问题<sup>[9]</sup>。Adamsen 等用 Br<sup>-</sup> 作为示踪剂, 进行了畦灌施肥试验<sup>[9]</sup>, 探讨了施肥方式即施肥时段的不同对水肥空间分布均匀性的影响。但由于上述研究还属于试验研究, 缺乏一个合理可行的模型工具, 因而还未能提出畦灌施肥技术要素的优化组合。

本文以零惯性量模型<sup>[8~10]</sup>作为水流模型, 一维

的对流扩散方程 ADE<sup>[9]</sup> 作为地表溶质运移方程, 分别采用 Preissmann 隐式格式有限差和特征线法<sup>[11,12]</sup> 进行数值求解, 建立畦灌施肥地表溶质运移模型, 并利用田间试验数据对其合理性进行验证, 以期为实现畦灌施肥技术要素优化组合提供可行的模型工具。

## 1 数学模型

### 1.1 水流运动基本方程

本文采用的零惯性量模型<sup>[8~10]</sup>是由完全水动力模型忽略加速度项简化而来的, 模型是基于质量守恒的基本思想, 以流速、水深及截面面积之间的水力关系建模的, 其关系满足圣维南方程组, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为入畦水流在任一时刻的断面流量;  $I$  为  $(x, t)$  点在单位长度上的入渗水量;  $t$  为净入渗时间;  $A$  为截面面积;  $S_0$  为畦田纵坡;  $S_i$  为阻力坡降;  $y$  为任意时刻的田面入流水深。

初始条件: 在计算区域内, 给定初始水深分布, 即

$$y(x, t_0) = y_0 \quad (x \in [0, L], t_0 = 0) \quad (2)$$

式中,  $y$  为水深;  $x$  为畦长;  $y_0$  为初始值;  $t_0$  为初始时刻;  $L$  为畦田总长。

边界条件: 给定流量的边界条件, 即

$$Q(x_0, t) = Q_0 \quad (x_0 = 0 \quad t \in [0, T]) \quad (3)$$

$$Q(x_L, t) = Q_L \quad (x_L = L \quad t \in [0, T]) \quad (4)$$

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家 863 计划现代农业技术领域重点项目课题 (2006AA100210)

作者简介: 李志新 (1976-), 男, 江西人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: lizx@whr.com。

式中,  $Q$  为边界流量;  $x_0, x_L$  为边界两端;  $t$  为时间;  $T$  为灌水时段长。

## 1.2 溶质运移方程

对于条形畦田, 由于其横向及垂向的长度远小于纵向的长度, 因此其水流中的溶质运移问题可概化为沿着水流方向的一维溶质运移问题, 畦田水流中溶质运移可用一维的 ADE 方程<sup>[3]</sup> 来描述:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} + G = \frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (5)$$

式中,  $h$  为水深;  $C$  为溶质浓度;  $t$  为时间;  $Q$  为单宽流量;  $x$  为纵向距离;  $i$  为入渗速率;  $D_x$  为纵向弥散系数。

初始条件: 在计算区域内, 给定初始溶质浓度分布, 即

$$C(x, t_0) = 0 \quad (x \in [0, L], t_0 = 0) \quad (6)$$

式中,  $C$  为溶质浓度;  $x$  为畦长;  $t_0$  为初始时刻;  $L$  为畦田总长。

边界条件: 分别为给定浓度和给定通量的边界条件, 即

$$C(x_0, t) = C_0 \quad (x_0 = 0, t \in [0, T]) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}) - (\frac{\partial(QC)}{\partial x} + G) |_{x=L} = q_L \quad (8)$$

$(x = L, t \in [0, T])$

式中,  $C$  为溶质浓度;  $C_0$  为畦首给定边界浓度条件;  $q_L$  为畦尾给定溶质通量边界条件, 其它含义同前。

## 2 模型的求解

### 2.1 地表水流运动模型

首先对上述方程组(1) 式用 Preissmann 隐式格式进行离散, 离散后得到的非线性方程组记为:

$$F_j(Z_j, Q_j, Z_{j+1}, Q_{j+1}) = 0 \quad (9)$$

$$G_j(Z_j, Q_j, Z_{j+1}, Q_{j+1}) = 0 \quad (10)$$

式中,  $F_j$  是连续方程的离散;  $G_j$  是动量方程的离散。该方程用牛顿迭代法进行求解, 假定经过  $k$  次迭代, 得:

$$F_j(Z_j^k, Q_j^k, Z_{j+1}^k, Q_{j+1}^k) = R_{f,j}^k \quad (11)$$

$$G_j(Z_j^k, Q_j^k, Z_{j+1}^k, Q_{j+1}^k) = R_{g,j}^k \quad (12)$$

根据牛顿迭代法剩余差和差分的关系得到如下迭代方程:

$$A_{1j}Z_j^{k+1} + B_{1j}Q_j^{k+1} + C_{1j}Z_{j+1}^{k+1} + D_{1j}Q_{j+1}^{k+1} = E_{1j} \quad (13)$$

$$A_{2j}Z_j^{k+1} + B_{2j}Q_j^{k+1} + C_{2j}Z_{j+1}^{k+1} + D_{2j}Q_{j+1}^{k+1} = E_{2j} \quad (14)$$

其中,  $A_{1j}, B_{1j}, C_{1j}, D_{1j}, A_{2j}, B_{2j}, C_{2j}, D_{2j}$  为两式求得的偏导数。最后, 可采用高斯消元法对上述方程

形成的迭代方程组进行求解。

### 2.2 地表溶质运移模块

本文对上述(5) 式的非稳定溶质运移对流-弥散方程的数值求解采用特征线法<sup>[11,12]</sup>。特征线法求解思路的特点是将溶质在水流中的对流和弥散分开, 分别加以求解, 然后再叠加起来。溶质在水流中的运动可视为沿着水流方向以水流速度  $u$  运动的动坐标系中的纯弥散问题。

求解具体步骤。首先剖分研究域成等大小的网格, 并放置一定数量的质点, 质点的初始浓度由初始条件确定。对于每个时间步, 每个质点在水流的作用下都沿着速度方向运动了一段距离, 新的位置通过对下式的差分,

$$u_x = \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

得到新位置为:

$$x_p^{k+1} = x_p^k + \Delta x_p = x_p^k + u_x \Delta t_{k+1} \quad (16)$$

$$p = 1, 2, L, N_p; k = 0, 1, 2, L, N_t - 1 \quad (17)$$

式中,  $x_p^{k+1}, x_p^k$  为质点  $p$  在  $k$  和  $k+1$  时间步的坐标位置;  $N_p$  为质点总数;  $N_t$  为时间步数。

由于质点运动, 网格中的质点及其浓度将发生变化, 对于  $i$  网格, 由对流作用在  $k+1$  时间步流入此网格的各质点的浓度平均为  $C_{i,j}^{k+1*}$ 。

在确定了对流作用引起的浓度改变后, 然后再考虑弥散作用、源汇作用等对浓度改变的贡献, 可由下式特征线微分方程确定:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{nb} \frac{\partial}{\partial x_i} (nb D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) + F \quad (18)$$

通过对以上方程的差分, 便可得到弥散作用和源汇作用等所引起的浓度改变, 如下式:

$$\Delta C_{i,j}^{k+1} = (\Delta C_{i,j}^{k+1})_1 + (\Delta C_{i,j}^{k+1})_2 \quad (19)$$

因此, 在得到了对流引起的浓度改变  $\Delta C_{i,j}^{k+1*}$  和弥散作用及源汇作用等所引起的浓度增量  $\Delta C_{i,j}^{k+1}$ , 便可得到对流弥散方程的解:

$$C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^{k+1*} + \Delta C_{i,j}^{k+1} \quad (20)$$

## 3 试验方案

### 3.1 试验设计

试验于 2007 年 4 月冬小麦春灌时, 在北京大兴国家节水灌溉工程技术研究中心试验基地进行, 试验场地包括 2 个土质为砂性壤土的条形畦块, 每个畦块规格为  $80 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ , 间距  $1.5 \text{ m}$ , 畦尾封口, 纵向坡度水平。灌水采用闸管灌水, 水流推进到畦尾即断水, 共 2 个试验小区, 其中 1 小区灌水单宽流

量为  $2 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ , 2 小区则为  $4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ; 施用的肥料为尿素, 尿素预先配置成溶液, 容器为容积约为  $400 \text{ L}$  的塑料桶, 通过软管与一小肥液泵连接, 肥液泵不断地将肥液送至畦首与水流混合, 混合后尿素浓度达到  $8.35 \text{ mmol/L}$ , 借助于水流沿畦长方向输送到农田。施肥方式为半程施肥, 即施肥开始时间迟于灌水开始时间, 待水流推进到畦长  $1/2$  距离时, 才开始施肥, 断肥时间则与断水时间相同。沿畦长方向设置 4 个取样点, 分别距畦首  $8 \text{ m}$ 、 $24 \text{ m}$ 、 $40 \text{ m}$ 、

$56 \text{ m}$ 。每个取样点在水流的推进消退时段内, 从灌水开始, 每隔  $5 \text{ min}$  取一次水样, 以测定水样中氮素的浓度。

### 3.2 测定项目及方法

降水、相对湿度、温度、太阳净辐射、风速; 自动气象站记录; 施肥的时间、关泵断水断肥的时间; 直接观测; 水流推进消退过程: 直接观测并记录, 见表 1。水样中的氮素浓度用流动分析仪测定。

表 1 水流推进、消退观测数据

Table 1 Measured data of flow advance and recession

距畦首距离 Distance (m)	1 小区 1 plot		2 小区 2 plot	
	推进时间(min) Advance time	消退时间(min) Recession time	推进时间(min) Advance time	消退时间(min) Recession time
0	0.0	137.0	0.0	145.0
8	1.8	137.0	2.1	130.0
16	6.5	133.5	4.2	111.0
24	11.5	133.5	7.2	138.0
32	16.5	130.0	11.2	130.0
40	21.8	136.5	14.0	150.0
48	28.5	109.5	17.0	127.0
56	35.5	117.5	23.0	126.0
64	43.5	107.5	24.4	153.0
72	53.0	101.5	29.0	144.0
80	62.5	122.5	33.0	153.0

## 4 模型参数确定

模型需要的参数包括田间水力参数和地表溶质弥散系数。

田间水力参数主要有田面糙率( $n$ )、土壤入渗参数。土壤的入渗参数采用 Kostiakov 经验型修正公式来表示<sup>[10,11]</sup>:

$$Z = kt^\alpha + f t \quad (21)$$

其中,  $Z$  为累积入渗水深;  $k$  为经验参数, 与田间初始水分状况和土壤质地有关;  $\alpha$  为经验参数, 取决于

土壤结构和质地;  $t$  为受水时间;  $f_0$  为稳定入渗率, 也与土壤质地和结构有关。

利用田间试验各小区的水流推进消退数据, 可通过基于 SGA 及 SRFR 的参数优化反演模型<sup>[14]</sup> 对上述水力参数进行优化估值。实测水流推进消退数据见表 1。在确定参数时, 估算精度采用 ARE 来衡量, ARE 是指参数为估值时模拟值与实测值的平均相对误差。表 2 为确定的参数值及其 ARE 值。表中显示, ARE 值为  $4.3\%$ , 小于  $15\%$  的许可误差, 表明确定的参数值是合理的。

表 2 基于水流推进、消退组合数据优化估算的参数值

Table 2 Parameters deprivation from optimization estimation based on measurement data of flow advance and recession

$n$	$K(\text{mm}/\text{min}^0)$	$\alpha$	$f_0(\text{mm}/\text{min})$	ARE(%)
0.08	3.75	0.26	0.0212	4.3

地面水流溶质运移参数是指沿着水流方向的弥散系数  $D_x$ 。而弥散系数  $D_x$  为机械弥散系数  $K_x$  和分子自由扩散系数  $\epsilon$  之和,  $\epsilon$  可取值  $0.0015 \text{ cm}^2/\text{min}$ 。而  $K_x$  用以下公式<sup>[6,7]</sup> 计算:

$$K_x = \frac{C_e}{C_d n} \sqrt{gh}^{5/6} v \quad (22)$$

式中,  $C_e$  为无量纲常数;  $h$  为水深(m);  $v$  为流速 ( $\text{m}/\text{min}$ );  $n$  为糙率;  $g$  为重力加速度;  $C_d$  为常数 ( $\text{m}^{0.5}/\text{min}$ ), 研究显示, 对于大多数畦灌,  $C_d$  为  $60$

( $\text{m}^{0.5}/\text{min}$ ), 而  $C_e$  则可取值为 4。

## 5 模型的试验验证

利用上述试验水样中尿素态氮的实测浓度数据, 对本文建立的模型进行验证。模拟结果包括两个试验小区共 10 个取样点的溶质浓度穿透曲线, 即在灌水时段内, 溶质浓度随时间变化的关系曲线。水流

消退期间, 可忽略分子扩散作用对溶质浓度的时空变化的影响, 因此模拟时间段取 100 min 即可。图 1(a b c d)、图 2(a b c d) 分别显示了单宽流量为  $2 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  (1 小区) 和  $4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  (2 小区) 时距畦首 8、24、40、56 m 处各点的溶质穿透曲线及对应的实测数据。

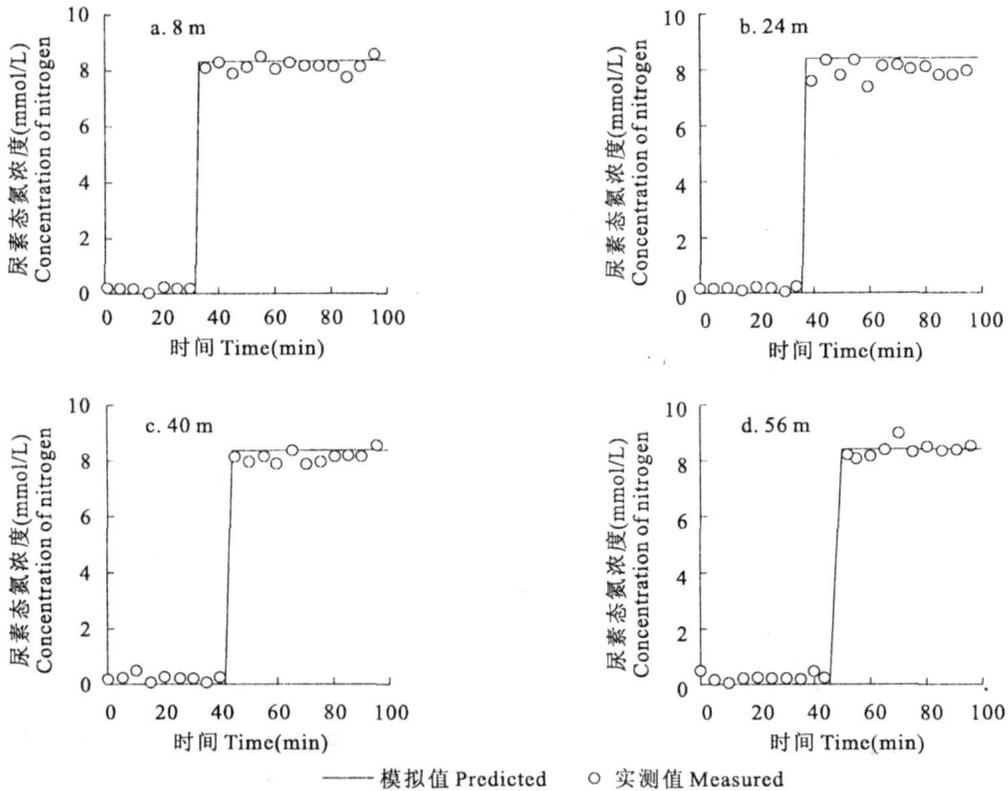


图 1 1 小区各取样点位置水流中溶质浓度随时间变化

Fig. 1 Water solute concentration versus time at different locations down the first border

模拟结果与实测数据的拟合效果可用平均相对残差  $MRR$  衡量<sup>[7]</sup>。计算公式如下:

$$MRR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_m - C_{mp}|}{C_m} \times 100\% \quad (23)$$

式中,  $C_m$  为实测数据 ( $\text{mmol}/\text{L}$ );  $C_{mp}$  为模拟值 ( $\text{mmol}/\text{L}$ );  $N$  为观测节点数量。

结果显示, 模型模拟结果与实测数据吻合良好。1 小区和 2 小区的  $MRR$  分别为 6.6% 和 6.2%, 整体平均  $MRR$  为 6.4%, 都低于 15% 的限度。另外图中还显示, 在取样时间间隔为 5 min 的条件下, 模拟的穿透曲线锋面(过渡带)上的实测数据都明显偏少, 实测数据不能反映曲线的急剧变化, 这要求在试验中, 能确定穿透曲线锋面的位置, 并在该时段内加密取样次数。

## 5 结论

本文构建了畦灌施肥下地表水流溶质运移模型, 并通过田间试验数据对模型进行了验证, 模拟结果与实测数据之间拟合较好, 表明构建的模型合理可行, 可作为畦灌施肥技术要素优化组合的工具; 结果还显示模拟溶质浓度穿透曲线平滑, 不存在数值振动现象, 过渡带保持陡峭则表明模型的数值求解方法所产生的数值弥散误差很小; 另外, 模拟结果与实测数据的拟合较好表明, 模型中尿素在畦灌施肥的时段内水流中发生的化学水解等转化可忽略, 同时土壤与水流中氮素之间交换的影响也较小。

### 参考文献:

- [1] 马军花, 任理, 龚元石, 等. 冬小麦生长条件下土壤氮素运移动态的数值模拟[J]. 水利学报, 2004, 33(3): 103-110.

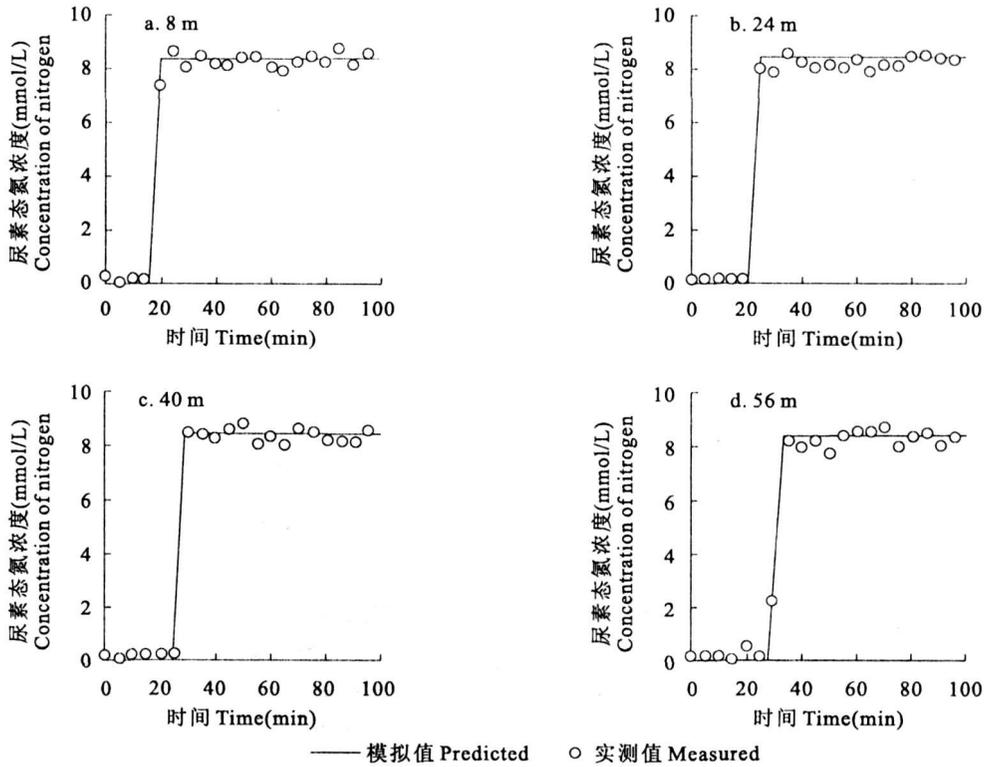


图 2 2 小区各取样点位置水流中溶质浓度随时间变化

Fig. 2 Water solute concentration versus time at different locations down the second border

[ 2 ] 李久生, 张建君, 饶敏杰, 等. 滴管施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J]. 水利学报, 2005, 36( 8 ): 932-938.

[ 3 ] 王 虎, 王旭东, 杨 莹, 等. 滴灌施肥条件下土壤铵氮分布规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24( 1 ): 51-54.

[ 4 ] Adamsen F J, Hunsaker D J, Perea H, et al. Border strip fertigation: effect of injection strategies on the distribution of bromide [J]. Transactions of The ASAE, 2005, 48( 2 ): 529-540.

[ 5 ] Zerihun D, Furman A, Warrick A W, et al. Coupled surface-subsurface flow model for improved basin irrigation management [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131( 2 ): 111-128.

[ 6 ] Zerihun D, Furman A, Warrick A W, et al. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. I. Model Development[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131( 5 ): 396-406.

[ 7 ] Zerihun D, Furman A, Warrick A W, et al. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. II. Model Evaluation[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131( 5 ): 407-419.

[ 8 ] 史学斌, 马孝义, 党恩魁, 等. 地面灌溉水流运动数值模拟研究综述[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23( 6 ): 188-193.

[ 9 ] 闫庆健, 李久生. 地面灌溉水流特性及水分利用率的数学模拟[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24( 2 ): 62-66.

[ 10 ] 李益农, 许 迪, 李福祥. 田面平整精度对畦灌系统性能影响的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2001, 17( 4 ): 43-48.

[ 11 ] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 北京科学出版社, 1997.

[ 12 ] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京: 清华大学, 2005.

[ 13 ] 白美健, 许 迪, 李益农, 等. 地面灌溉土壤入渗参数时空变异性试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19( 5 ): 120-123.

[ 14 ] 章少辉, 许 迪, 李益农, 等. 基于SGA 和SRFR 的畦灌入渗参数与糙率系数优化反演模型 II[J]. 水利学报, 2007, 38( 4 ): 402-408.

( 英文摘要下转第 172 页)

出版社, 2000.

[ 16 ] 周 天, 胡永军, 周晓梅, 等. DA-6 对野大麦幼苗光合作用和生长的影响[J]. 草业科学, 2004, 21( 4 ): 31-34.

[ 17 ] 李秧秧, 黄占斌. 节水农业中化控技术的应用研究[J]. 节水灌溉, 2001, ( 3 ): 4-7.

## Influence of DA-6 on physiological and growth targets of peanut under drought stress

YU Jun hong, PENG Zhi ping<sup>\*</sup>, YANG Shao hai, HUANG Ji chuan, ZHAN Yu zhong  
( Soil and Fertilizer Research Institute, GAAS; Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling  
and Farm Land Conservation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** : A pot culture experiment was carried out to study the effect of DA-6 on physiology and growth targets of peanut during flowering stage under drought stress. The results indicated that the application of DA-6 could alleviate harm to peanut caused by drought stress, strengthen accumulation of the photosynthetic product and capacity of water utilization and promote the amount of nutrient absorption and pod yield. Compared with the drought stress control, the net photosynthetic speed and the transpiration rate was increased by 48.9% and 26.6% after DA-6 spraying, and 47.8% and 68.0% after DA-6 applying to soil. The water utilization efficiency of DA-6 spray was also distinctly enhanced. Furthermore, the proline content was significantly reduced by 35.1% and 62.0% in DA-6 spray and soil application treatment, MDA content was decreased by 44.9% and 34.2%, while the peanut pod yield was increased by 7.9% and 18.3%, the rough fat content was also significantly enhanced. In all treatments, DA-6 spray had the most significant effect in improving water utilization efficiency and rough fat content. Therefore, DA-6 could be a new potential chemical regulator to strengthen the crops drought resistance in water saving agriculture.

**Key words** : DA-6 (diethyl aminoethyl hexanoate); drought stress; peanut

(上接第 151 页)

## Development and validation of surface fertigation flow and solute transport model

LI Zhi xing, XU Di, LI Yi nong  
( National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract** : The surface fertigation solute transport model is developed with zero inertia model as irrigation flow model and one dimension ADE equation as surface solute transport equation, and solving them separately with the methods of Preissman for matrix finite difference and characteristic curve. It provides an effective model tool to optimize designation of technical parameters combination for fertigation. The research results show that there is good agreement between the measured data and the predicted result by the model, so the suggested model could offer an important tool for optimization of technique factors combination for fertigation; in the fertigation experiment, the research results with both the solutes of ammonia nitrogen and  $\text{Br}^-$  are similar, so the research results in both conditions can be referred to by each other.

**Key words** : surface fertigation; flow; solute transport; advection-diffusion