排灌机械工程学报 2012年1月 Jan. 2012 第30卷 第1期 Vol. 30 No. 1
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.01.022

二维撒施畦灌地表水流溶质运移模型：Ⅰ建模

章少辉[1,2]，许迪[1,2]，李益农[1,2]，白美健[1,2]
（1. 中国水利水电科学研究院水利研究所，北京 100048；2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心，北京 100048）

摘要：基于二维畦灌全水动力学模型模拟的地表水深及畦面任意点垂向均布的流速场，通过把湍流垂向流速分布律由标量推广为矢量形式，并结合不可压缩流体力学连续性方程，构造了沿二维畦面及垂向非均布的三维流速场；利用能够描述二维畦面及垂向三个维度的溶质浓度场非均布变化特征的对流－扩散方程，描述传统撒施下的二维畦灌地表溶质运移过程，采用构造的三维流速场，基于湍流近壁模型构造了溶质扩散系数，从而构建了肥料撒施畦灌地表水流溶质运移控制方程；借助于畦灌地表水流模型中的薄水层假设，构建畦面溶质浓度初始条件，并采用一级动力学方程和任意点的固态溶质总量守恒特征，构建了撒施的肥料溶解与输运过程边界条件，从而构建起撒施肥料下的二维畦灌地表水流溶质运移模拟模型.

关键词：肥料溶质；畦灌；撒施；非均布；流速场；溶质浓度场
中图分类号：S275.3；O351.2　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)01-0112-06

Broadcasted fertilizer solute transport model in 2D surface water flow of border irrigation: I. Modeling

Zhang Shaohui[1,2], *Xu Di*[1,2], *Li Yinong*[1,2], *Bai Meijian*[1,2]
(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The surface water depth cross land was obtained numerically by simulating the 2D full hydrodynamics model in border irrigation firstly. Then the linear and logarithmic profile of turbulent velocity along the depth in scale form was extended to those in tensor one; subsequently, a non-uniform 3D flow velocity field across the land and along vertical direction was constructed by combining the continuous equation of incompressible hydrodynamics. Eventually, a convection-diffusion equation was adopted to describe the broadcasted fertilizer solute concentration across land and along depth of water in border irrigation. The diffusion coefficient was determined by using the nearby wall non-uniform flow velocity model. The initial condition was determined with the thin water layer hypothesis in surface water flow simulation of border irrigation. The overland boundary for solute dissolution and transportation was imposed by using a first-order kinetics reaction model and mass conservation equation of solid fertilizer at a point. In this way, a fertilizer solute transport model is proposed in a 2D surface flow of border irrigation.

Key words: fertilizer solute; border irrigation; conventional fertilization; non-uniform distribution; flow velocity field; solute concentration field

收稿日期：2011-04-26
基金项目：国家863计划项目(2011AA100505)；国家科技支撑计划资助项目(2011BAD25B04)
作者简介：章少辉(1977—)，男，河北石家庄人，工程师，博士研究生(zhangsh@iwhr.com)，主要从事田间节水灌溉技术研究.
许迪(1957—)，男，北京海淀人，教授级高级工程师，博士生导师(xudi@iwhr.com)，主要从事农业节水应用基础与技术研究.

传统肥料撒施是我国当前普遍采用的地面灌溉施肥方式，开展相关问题的数值模拟研究，能够为撒施肥料下的畦灌系统设计、管理与性能评价提供模型工具，这对于改进地面灌溉施肥方式、减轻由农业生产带来的面源污染等问题具有重要的理论与现实意义[1-2]. 传统撒施施肥方式是通过人工或机械预先把肥料以固体颗粒的形式均匀撒施于地表，随着畦灌水流的推进及向各个方向的非恒定扩散，肥料不断溶解，并向上输运至地表水体和下渗至土壤中. 构建数学模型描述上述物理现象时，依然沿用基于全水动力学模型构建的液体施肥畦灌模型，即流速与溶质浓度沿畦长任意垂向断面内均布的前提假设[3-4]显然不再合理[5]. 为此，一些学者采用流体力学基本的 Navior – Stokes 方程描述该类问题. 然而，由于自由水面捕捉及 Navior – Stokes 方程求解的困难[6]，该类模型难以应用于实际问题，且难以推广至畦面二维的情形[7]. 为此，基于全水动力学模型求得的水深作为自由水面边界，借助于湍流理论中的经验公式及不可压缩流体力学连续性方程，重新构建了畦灌过程中沿畦长及垂向非均布水流流速场，依此构建了撒施肥料下的一维畦灌地表水流与溶质运移模型[8].

然而，当宽畦内的流速及水深等物理量在沿畦面横向存在明显的时空变异性时，撒施于地表的固体肥料不仅具有不断溶解并输运至地表水体和入渗至土壤的典型运动现象，还将随畦灌水流发生平面二维任意方向的扩散与绕流等复杂输运现象，且后一现象往往占据主导地位. 此时，撒施肥料下的一维畦灌地表水流与溶质运移模型显然难以描述该物理过程，相关的控制方程、初始及边界条件都将发生本质变化. 为了合理地模拟撒施于地表的肥料在二维畦面及垂向的非线性耦合演变过程，文中对已构建的一维模型进行推广与发展，构建二维撒施肥料畦灌地表水流与溶质运移模型.

1　二维畦灌地表水流运动模型

由全水动力学模型获得的沿垂向均布的二维畦面流速场以及水深过程作为已知条件，通过把湍流流速线性与对数分布律推广为矢量形式，以此获得二维畦面沿垂向非均布的流速场. 由全水动力学模型获得的入渗通量和水深过程作为已知条件，借助于三维不可压缩流体力学连续性方程，计算获得沿垂向非均布的垂向流速，从而构建畦灌条件下沿二维畦面及垂向非均布的三维流速场.

1.1　二维畦灌全水动力学模型

1.1.1　控制方程

畦灌浅水流运动过程的流速与压强等物理量在垂向的变化过程远小于水平方向，因此往往忽略垂向物理量的变化过程. 在畦田任意垂向断面内流速呈均布状态的前提假设下，采用二维守恒型畦灌地表水流运动模型能够以较高的精度描述畦灌地表水流运动过程[9]，即

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y}=\boldsymbol{S}, \tag{1}$$

式中：t 为畦灌时间坐标，s；x 和 y 为畦田平面内两个相互正交的空间坐标，m；$\boldsymbol{U}$ 为因变量矢量；$\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{G}$ 分别为沿 x 和 y 坐标向的物理通量；$\boldsymbol{S}$ 为源项矢量，其为地形矢量 $\boldsymbol{S}_1$、糙率矢量 $\boldsymbol{S}_2$ 和入渗矢量 $\boldsymbol{S}_3$ 之和，相应的表达式为

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix} H \\ Q_x \\ Q_y \end{pmatrix},\boldsymbol{F}=\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_xU_x+\frac{1}{2}gH^2 \\ Q_yU_x \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{pmatrix} Q_y \\ Q_xU_y \\ Q_yU_y+\frac{1}{2}gH^2 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix} -i_c \\ -gH\frac{\partial b}{\partial x}-\frac{gn^2HU_x\sqrt{U_x^2+U_y^2}}{H^{4/3}}+\frac{1}{2}U_xi_c \\ -gH\frac{\partial b}{\partial y}-\frac{gn^2HU_y\sqrt{U_x^2+U_y^2}}{H^{4/3}}+\frac{1}{2}U_yi_c \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{S}_1=\begin{pmatrix} 0 \\ -gH\frac{\partial z}{\partial x} \\ -gH\frac{\partial z}{\partial y} \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{S}_2=\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{gn^2HU_x\sqrt{U_x^2+U_y^2}}{H^{4/3}} \\ -\frac{gn^2HU_y\sqrt{U_x^2+U_y^2}}{H^{4/3}} \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{S}_3=\begin{pmatrix} -i_c \\ \frac{1}{2}U_xi_c \\ \frac{1}{2}U_yi_c \end{pmatrix},$$

式中:H 为畦内任意点的地表水深,m;Q_x 和 Q_y 分别沿 x 和 y 坐标通过畦内任意垂向断面的单宽流量,$m^3/(s \cdot m)$;U_x 和 U_y 分别为沿 x 和 y 坐标畦内任意垂向断面内的均布流速,m/s;i_c 为地表水入渗通量,采用kostiakov经验入渗公式计算,$m^3/(s \cdot m^2)$;g 为重力加速度,m/s^2;b 为畦面高程,m;n 为Manning糙率系数,$m^{1/6}$.

1.1.2 初始与边界条件

求解式(1)的初始条件为畦内流速 U_x 和 U_y 为0,畦面地表水深 H 为0. 在畦田边界存在入流时,一般存在角入流、扇入流和线入流这3种边界入流条件,这3种入流边界条件均为给定的入流量 Q_0,且其地表水深 H 均采用亚临界流条件计算获得[10]. 畦灌结束后,畦田边界各点均无水流流进和流出. 在无流边界条件下,畦田边界单元格外边界处,沿 x 和 y 坐标方向需满足法向零流量条件 $Q_x = 0$ 和 $Q_y = 0$.

1.1.3 数值解法

基于混合数值解法求解畦灌全水动力学模型,得到沿畦内任意垂向均布内的二维流速 U_x 和 U_y、由地表水深 H 构成的动态自由水面边界以及地表水入渗通量 i_c[10].

1.2 二维畦面及垂向非均布流速

沿二维畦面及垂向断面内非均布流速矢量场 $\boldsymbol{u}$ 存在3个分量:沿 x 坐标向流速分量 u_x,沿 y 坐标向流速分量 u_y,沿垂向 z 坐标向的流速分量 u_z. 构造沿二维畦面和垂向的非均布流速场,即是构造这3个流速分量场.

1.2.1 流速分量 u_x 和 u_y

畦灌地表水流运动过程缓慢且近似均匀,可假设邻近畦面的水流不存在分离流现象. 在该假设下,当不存在 y 坐标方向时,假设水平流速 u_x 的垂向分布为线性和对数律是合理的[8]. 当存在 y 坐标方向时,如果把流速 u_x 和 u_y 的合成矢量标记为 $\boldsymbol{u}^{(p)}$,则假设 $\boldsymbol{u}^{(p)}$ 在垂向的分布仍然符合线性与对数律[11],即

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}^{(p)} = \boldsymbol{u}_\tau^{(p)} z^+, 0 < z^+ < 12.2, \\ \boldsymbol{u}^{(p)} = \dfrac{\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}}{\kappa} \ln z^+ + C, 12.2 < z^+ < \dfrac{H\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}}{\nu}, \end{cases} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}$ 为沿畦面 x 和 y 坐标向的摩擦速度矢量,m/s;z^+ 为以畦面为基准点垂直向上的无量纲距离,且 $z^+ = \dfrac{z|\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}|}{\nu}$;$\kappa$ 为Karman常数,取值0.41;ν 为地表水流运动黏性系数,取值 1.31×10^{-6} m^2/s;C 为待定常数.

式(2)中的 C 和 $\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}$ 为两个需要确定的未知量. 当 $z^+ = 12.2$ 时,分别使得式(2)中的两个分量式相等,即

$$\frac{\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}}{\kappa} \ln z^+ + C = \boldsymbol{u}_\tau^{(p)} z^+. \tag{3}$$

沿垂向坐标,由地表至自由水面之间,非均布流速 $\boldsymbol{u}^{(p)}$ 积分平均化为畦灌地表水流运动模型中均布流速 U_x,U_y 的相应关系式可表达为[12]

$$\frac{1}{H}\int_0^H |\boldsymbol{u}^{(p)}| \, dz = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}. \tag{4}$$

通过式(3),(4)即可确定式(2)中的未知量 C 和 $\boldsymbol{u}_\tau^{(p)}$,从而得到 $\boldsymbol{u}^{(p)}$ 的具体表达式. 把 $\boldsymbol{u}^{(p)}$ 向 x 和 y 坐标轴做投影,可获得 u_x,u_y 沿垂向的表达式,

$$u_x = \boldsymbol{u}^{(p)} \cos\theta, u_y = \boldsymbol{u}^{(p)} \sin\theta, \tag{5}$$

式中:θ 为矢量 $\boldsymbol{u}^{(p)}$ 与 x 坐标轴的夹角.

1.2.2 流速分量 u_z

以地表水入渗通量 i_c 作为地表流速场的边界条件,在由地表至水深 H 的动态自由水面边界空间域内,基于已构造的流速 u_x 和 u_y,通过不可压缩流体力学连续性方程式(6),求解 z 方向的流速 u_z,即

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \tag{6}$$

1.2.3 数值解法

沿二维畦面及垂向的三维非均布流速场构造模型中,仅式(6)为偏微分方程,因此只叙述该式的数值解法. 在任意未知时间点($w+1$)及二维畦面任意空间点(i,j)处,采用有限差分法的中心差分格式空间离散椭圆型方程式(6),经过移项和组合后可得

$$(u_z)_{i,j,l+1}^{w+1} = (u_z)_{i,j,l-1}^{w+1} - \frac{\Delta z}{\Delta x}[(u_x)_{i+1,j,l}^{w+1} - (u_x)_{i-1,j,l}^{w+1}] - \frac{\Delta z}{\Delta y}[(u_y)_{i,j+1,l}^{w+1} - (u_y)_{i,j-1,l}^{w+1}]. \tag{7}$$

以由全水动力学模型获得的($w+1$)时刻的地表水深 H 和入渗通量 i_c 作为地表流场边界条件,以流速 u_x 和 u_y 作为已知流场条件,利用式(7)从地表沿垂向依次向上即可推求得到垂向流速 u_z,从而得到二维畦面及垂向非均布的三维流速场.

2 二维畦灌地表溶质运移模型

2.1 溶质浓度沿垂向均布模型

2.1.1 控制方程

基于由二维畦灌全水动力学模型获得的垂向均

布流速分量 U_x，U_y，描述畦面任意点溶质浓度垂向均布态的二维畦灌地表溶质运移过程[12] 为

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial (U_x C)}{\partial x}+\frac{\partial (U_y C)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y}+D_{yx}\frac{\partial C}{\partial x}\right), \tag{8}$$

式中：C 为地表水流中沿二维畦面任意点垂向均布的溶质质量浓度，mg/L；D_{xx}，D_{xy}，D_{yx}，D_{yy} 分别为沿畦内任意垂向断面内均布的溶质扩散张量系数，m^2/s.

2.1.2 初始与边界条件

1）初始条件：

$$C(x,y,0)=0,\quad 0\leqslant x\leqslant L_x,0\leqslant y\leqslant L_y. \tag{9}$$

2）入流边界条件：

$$C(0,y,t)=\begin{cases}C_0\\0\end{cases}\text{或 } C(x,0,t)=\begin{cases}C_0,0\leqslant t\leqslant T_s,\\0,t>T_s,\end{cases}\quad 0\leqslant x\leqslant L_x,0\leqslant y\leqslant L_y, \tag{10}$$

式中：C_0 为入流溶质质量浓度，mg/L；T_s 为畦灌施肥时刻，s.

3）无流边界条件：

$$\frac{\partial C(L_x,y,t)}{\partial y}=0\text{ 或}\frac{\partial C(x,L_y,t)}{\partial x}=0,\quad 0\leqslant x\leqslant L_x,0\leqslant y\leqslant L_y. \tag{11}$$

2.2 溶质浓度沿垂向非均布模型

2.2.1 控制方程

基于上述构造的二维畦田及垂向非均布的三维流速场，用于描述溶质浓度在二维畦面及垂向非均布变化过程的控制方程[12] 可表达为

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\partial (u_x c)}{\partial x}+\frac{\partial (u_y c)}{\partial y}+\frac{\partial (u_z c)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(d_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+d_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+d_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(d_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+d_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+d_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(d_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+d_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+d_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}\right), \tag{12}$$

式中：c 为地表水流沿二维畦面及垂向非均布的溶质质量浓度，mg/L；u_x，u_y 和 u_z 分别为上述构造的沿二维畦面 x，y 坐标向及垂向 z 坐标向的非均布流速场，m/s；d_{xx}，d_{yy}，d_{zz}，d_{xy}，d_{yx}，d_{xz}，d_{zx}，d_{yz} 和 d_{zy} 分别为地表溶质沿二维畦面 x，y 坐标向及垂向 z 坐标向非均布的张量型溶质扩散系数，m^2/s.

2.2.2 初始条件

灌水前，畦面单位面积上预先撒施于地表的固态化肥肥料溶质量为 C_s. 固态肥料溶质使得任意二维畦面点的初始溶质浓度为无穷大，均为求解问题的奇点. 为了能够进行运算，借助于数值求解畦灌地表水流运动控制方程时采用的技术手段，即假设在畦面地表存在一个初始薄水层[10]，并认为该水层内的溶质浓度为常温下的饱和溶解值，则求解式(12)的初始条件可表达为

$$c_{\text{initial}}(x,y,b,0)=\alpha_c c_0,\quad 0\leqslant x\leqslant L_x,0\leqslant y\leqslant L_y, \tag{13}$$

式中：c_0 为常温下撒施于地表溶质的饱和溶解质量浓度，mg/L；α_c 为 c_0 的修正系数，取决于以下两个因素的非线性耦合效应，其一是实际温度与常温间偏差引起的溶解度变化，其二是实际温度下非饱和溶解量与溶解度间的偏差.

2.2.3 边界条件

1）畦田地表边界条件：在初始条件式(13)的基础上，采用一级动力学方程描述畦内地表肥料的溶解过程[13]，可得

$$\frac{\partial c}{\partial t}=k_d(c_{\text{initial}}-c),\quad 0<t<T_s, \tag{14}$$

式中：k_d 为局部反应速率常数，1/s；T_s 为畦内地表任意点处撒施的肥料溶解后，被完全输运至地表水流和下渗至土壤中的时刻，s.

在畦内地表单位面积内，用 C_{up} 和 C_{down} 分别标记向上输运至地表水体和下渗至土壤的溶质总量：

$$C_{up}(T_s)=\int_0^{T_s}(d_{xy}+d_{yy}+d_{zy})\frac{\partial c}{\partial y}dt, \tag{15}$$

$$C_{down}(T_s)=\int_0^{T_s}i_c c dt. \tag{16}$$

按照式(15)和(16)的物理意义，T_s 应满足

$$C_{up}(T_s)+C_{down}(T_s)=C_s, \tag{17}$$

式中：C_s 为撒施于单位面积畦面地表的溶质量，mg.

2）自由水面边界为浓度梯度为 0 条件，可表达为

$$\frac{\partial}{\partial y}c(x,y,H,t)=0,\quad t>0. \tag{18}$$

3）畦田周边不透水堤埂边界也为浓度梯度为 0 条件，可表述为

$$\frac{\partial}{\partial y}c(0,y,z,t)=0\text{ 或}\frac{\partial}{\partial y}c(L_x,y,z,t)=0,\quad 0\leqslant y\leqslant L_y,t>0; \tag{19}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}c(x,0,z,t)=0\text{ 或}\frac{\partial}{\partial x}c(x,L_y,z,t)=0,$$

$$0 \leqslant x \leqslant L_x, t > 0. \tag{20}$$

2.2.4 溶质扩散系数

二阶张量型溶质扩散系数 $d_{ij}(i,j = x,y,z)$ 是与水流湍流运动有关的扩散系数和分子弥散系数之和[11]：

$$d_{ij} = k_{ij} + \varepsilon, (i,j = x,y,z), \tag{21}$$

式中：k_{ij} 为地表水流湍流运动引起的分别沿 x,y,z 方向的溶质扩散系数，m^2/s；ε 为分子弥散系数，常温常压下为常数，取值 2.5×10^{-9} m^2/s.

根据畦灌地表水流深度相对较浅的特点，可采用式(22)计算式(21)中的 k_{ij}[11]：

$$k_{ij} = \frac{(\kappa z)^2[1 - \exp(-y^+/A^+)]^2 \Omega_{ij}}{S_t}, \quad (i,j = x,y,z), \tag{22}$$

式中：S_t 为地表水流湍流施密特系数；A^+ 为常数值，取值26；Ω_{ij} 为地表水流运动涡量绝对值，m·/(s·m).

对于式(22)中的 $\Omega_{ij}(i,j = x,y,z)$，计算公式为

$$\begin{cases} \Omega_{xy} = \Omega_{yx} = \left| \dfrac{\partial u_y}{\partial x} - \dfrac{\partial u_x}{\partial y} \right|, \\ \Omega_{zy} = \Omega_{yz} = \left| \dfrac{\partial u_z}{\partial y} - \dfrac{\partial u_y}{\partial z} \right|, \\ \Omega_{zx} = \Omega_{xz} = \left| \dfrac{\partial u_z}{\partial x} - \dfrac{\partial u_x}{\partial z} \right|; \end{cases} \tag{23}$$

$$\Omega_{xx} = \Omega_{yy} = \Omega_{zz} = 0. \tag{24}$$

2.2.5 数值解法

数值求解式(12)的时间格式采用具有TVD性质的二阶精度显时间格式和具备二阶精度的反扩散有限体积法空间离散格式数值求解[14].

3 结 论

采用数值模型描述撒施施肥方式下的畦灌地表水流与溶质运移过程，依然沿用液施施肥下沿垂向流速和溶质浓度均匀分布的物理假设显然不再合理. 为此，文中以畦灌全水动力学模型得到的沿畦面垂向均布的二维流速 U_x 和 U_y 以及地表水深 H 构成的动态自由水面边界作为已知条件，通过把湍流流速线性与对数分布规律由标量推广为矢量形式，构建了沿二维畦面任意水平向的垂向均布流速 u_x 和 u_y. 以畦灌全水动力学模型得到地表入渗通量作为边界条件，基于构造的流速 u_x 和 u_y，采用三维不可压缩流体力学连续方程，获得了沿垂向非均布的垂向流速 u_z，从而构造了沿二维畦面及垂向非均布的三维流速场.

基于构建的三维流速场 u_x，u_y 和 u_z，利用能够反映二维畦面及垂向溶质浓度非均布变化的对流–扩散方程描述二维畦灌地表溶质运移过程，并采用湍流理论中的相应经验公式构造溶质扩散系统，构建了二维撒施肥料畦灌地表水流与溶质运移控制方程. 借助于畦灌水流模拟时采用的浅水层假设构建畦面初始条件，并采用一级动力学方程和任意点的固态溶质总量，构建了撒施于地表的肥料溶解与输运过程边界条件，从而构建了撒施肥料下的二维畦灌地表水流溶质运移模拟模型. 对该模型模拟效果的验证将另文介绍.

参考文献(References)

[1] Murillo J, García-Navarro P, Burguete J. Analysis of a second-order upwind method for the simulation of solute transport in 2D shallow water flow [J]. International Journal for Numerical Method in Fluids, 2008, 56(4): 661–686.

[2] 梁艳萍，许迪，李益农，等. 畦灌施肥模式对土壤水氮时空分布的影响[J]. 水利学报，2008，39(11)：1221–1228.
Liang Yanping, Xu Di, Li Yinong, et al. Influence of border strip fertigation on spatial and temporal distribution of soil water and nitrate nitrogen [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1221–1228. (in Chinese)

[3] Abbasi F, Simunek J, van Genuchten M T, et al. Overland water flow and solute transport: model development and field data analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(2): 71–81.

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

[5] Bradford S F, Katopodes N D. Nonhydrostatic model for surface irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(4): 200–212.

[6] Shao Songdong, Lo Edmond Y M. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface [J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(7): 787–800.

[7] Bradford S F, Katopodes B F. Finite volume model for non-level basin irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(4): 216–223.

(下转第124页)