doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.019

干旱区滴灌均匀系数对土壤水氮分布影响模拟*

关红杰 李久生 栗岩峰

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:基于 HYDRUS - 2D 软件建立了棉花膜下滴灌水氮运移模型,利用干旱区棉花膜下滴灌试验数据对模型进行 了参数率定和验证。将灌水器流量沿毛管的变化离散为依次逐段减小,并假设土壤水分在各段之间不存在交换, 利用验证后的数学模型研究了干旱区不同滴灌均匀系数时土壤水氮分布特征,评估了土壤空间变异对水氮分布均 匀性的影响。模拟结果表明,随着灌水的进行,滴灌均匀系数 C_a为 0.60 和 0.80 时,土壤含水率和 NO₃⁻-N 质量浓 度均匀系数均呈下降趋势,而 C_a = 0.95 时变化较平稳;滴灌均匀系数越低,灌水后土壤含水率和 NO₃⁻-N 质量浓度 均匀系数降低的幅度越大;土壤 NO₃⁻-N 质量浓度均匀系数的变化范围为 0.35 ~ 1.00,低于土壤含水率均匀系数。 田间试验存在的土壤空间变异在一定程度上增加了土壤水氮分布不均匀性。

关键词:棉花 滴灌 均匀系数 含水率 数学模型

中图分类号: S275.6; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)03-0107-11

引言

灌水均匀性是微灌系统设计和评价的重要指 标。采用高的灌水均匀系数虽有利于获得均匀的水 分和养分分布,但可能增加系统投资和运行费 用^[1]。GB/T 504852009 中规定,已建成的微灌系统 宜采用灌水均匀系数进行灌水均匀性评价,灌水均 匀系数 C₄不宜小于 0.8。文献 [2] 中建议凯勒均匀 系数 E₁为 0.70~0.95,具体取值需要考虑灌水器类 型(点源或线源)、作物、灌水器间距和地形等因素。 上述标准中,灌水均匀系数的取值多源于经验值。 针对现行微灌均匀系数标准存在的科学依据不足等 问题,一些学者在不同气候区针对典型作物研究了 滴灌均匀系数对土壤水氮分布的影响[3-5]及作物生 长和产量对滴灌均匀系数的响应[6-8],试验结果为 滴灌均匀系数标准的完善提供了充分的科学依据。 但由于田间试验存在土壤空间变异,可能会对土壤 水氮分布产生一定影响。为研究其影响程度,有必 要通过模拟方法研究无土壤空间变异条件下滴灌均 匀系数对土壤水氮分布的影响,评价土壤空间变异 对土壤水氮分布均匀性的影响。也有一些学者通过 数值模拟研究了滴灌均匀系数对作物产量的影 响^[9-10]。为了验证这些推论和完善以上模拟模型, 也有必要通过模拟方法研究滴灌均匀系数对土壤水 氮分布的影响。

本文基于 HYDRUS - 2D 软件建立干旱区棉花 膜下滴灌水氮运移的数学模型,利用棉花膜下滴灌 试验数据对模型进行参数率定和验证,利用验证后 的数学模型研究无土壤空间变异条件下不同滴灌均 匀系数时土壤水氮分布特征,评估土壤空间变异对 水氮分布均匀性的影响。

1 田间试验

2010年和2011年在新疆生产建设兵团水利局 灌溉中心试验站(44°06′N,87°30′E,海拔700m) 进行了棉花膜下滴灌试验。试验区属典型的温带大 陆性干旱气候。利用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 2000,英国)和环刀取土法分别测定不同深度土壤 的颗粒组成和容重。距试验地块50m安装无线自 动气象站(Vantage Pro2,美国 Davis 公司),用来监 测降水量、温度、湿度、太阳辐射和风速等气象数据, 取样间隔为30min。气象站采用 FAO 推荐的 Penman – Monteith 公式^[11]计算参考作物腾发量并 自动记录。生育期内共灌水9次,2010年和2011 年灌溉定额分别为279.2、280.0mm。肥料选用尿 素,2010年和2011年施氮量分别为110.4、 138.0kg/hm²,施肥时先将尿素溶于肥料桶中,用压 差式施肥罐通过滴灌系统分6次和7次施入试验小

*国家自然科学基金资助项目(50979115、51179204)

作者简介:关红杰,博士生,主要从事节水灌溉技术与理论研究,E-mail: guanhong311@163.com

通讯作者: 李久生,研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与理论研究, E-mail: lijs@iwhr.com

收稿日期: 2013-03-27 修回日期: 2013-05-15

区。试验详细信息可参照文献[5]。

对特定土壤而言,滴灌均匀系数 C_u、灌水量及 其交互作用可能是影响土壤水氮分布的主要因素, 因此采用 C₄和灌水量完全组合试验设计,每个因素 均设置3个水平。为了探讨降低现行 C_标准的可 能性,选取现行均匀系数标准 0.8 作为 C, 的中水 平,同时分别设置1个低于和高于现行标准的均匀 系数水平,即C,设置0.65、0.80和0.95 三水平(简 记为 C1、C2 和 C3)。C1 和 C2 处理采用 6 种不同流 量(0.10 MPa 下标称流量为 1.10、1.40、1.75、2.10、 2.70、3.00 L/h:灌水器间距为 30 cm) 的灌水器随机 组合而成,每种灌水器的个数按灌水单元内灌水器 流量服从正态分布的原则^[12],利用Monte - Carlo方 法确定^[13]。C3 处理采用标称流量为2.10 L/h的滴 灌带, C1、C2 和 C3 处理平均流量设计值均为 2.10 L/h。灌水量水平设置以现行充分灌溉制度^[5] 为基准,并考虑降低灌水量的可能性,设置充分灌溉 水量的 50%、75% 和 100% 3 个水平(简记为 I1、I2 和 I3)。试验共9个处理,每个处理设置3个重复, 共27个试验小区。每个小区包含3幅膜,共12行 棉花,小区面积为50m×4.35m。小区在田块内随 机排列。

每个处理选择1个小区,在小区中间膜的宽行 内,沿滴灌带方向均匀布置7个点,埋设深度为 1.3 m的 Trime 探管,测点间距为7.5 m,测点位置与 滴灌带垂直距离 15 cm,用 Trime - FM 土壤剖面含 水率测量系统(IMKO,德国)测试0~100 cm 土壤的 体积含水率,0~20 cm 为1层,20~100 cm 按10 cm 的等间距测试。正常情况下每周测试1次,灌水前 和灌水后1d及大于5mm降雨后加测1次。每个 处理选择1个小区,分别在蕾期、花期和铃期取样, 取土深度为60 cm,每20 cm 1 层,前2 次取样均在 滴灌施肥结束2d后,第3次取样分别在灌水结束 22 d 和 31 d 后进行。每个小区沿棉花窄行中间按 大致均匀原则布置7个取样点(为了避免取样对 Trime - FM产生影响,取样点沿棉花行距 Trime 探管 位置约80 cm)。将所取土样在阴凉处风干后研磨, 过2 mm筛。每个样取风干土 20 g,用浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液 50 mL 浸提, 再用流动分析仪(Auto Analyzer 3,德国 BRAN + LUEBBE 公司)测定浸提液 的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。试验设计和试验方法参 照文献[5]。

灌水器流量、土壤含水率和土壤氮素浓度的分 布均匀性均用克里斯琴森均匀系数 C_u表示,公式为

$$C_{u} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_{i} - \overline{x}|}{n \, \overline{x}}$$
(1)

式中 x_i — 各指标的第 i 个观测值 x — 各指标的均值 n — 各指标的测试个数

2 数学模型

2.1 模型构建

当灌水器间距较小(如:20~40 cm),滴灌过程 中灌水器形成的湿润体很快会重迭,沿毛管方向土 壤含水率基本一致,故可将田间尺度膜下滴灌条件 下的土壤水氮运动简化成线源在垂直剖面上的二维 运动^[14-15]。根据田间试验棉花种植和滴灌带布置 模式(图1),地表线源土壤水氮运移模拟计算区域 宽度取为毛管间距 145 cm 的一半(72.5 cm)、深度 取 150 cm(图 2)。滴灌带长度为 50 m。考虑到 HYDRUS-2D模拟只能在根系分布固定的条件下 进行,因此,对棉花生育期内水氮分布进行分段模 拟。花期是棉花的关键生育阶段,需水需肥多,生育 期灌溉施肥多集中在该时期,另外,该时期根系生长 已基本趋于稳定,因此,选取花期进行模型的验证和 应用。

2.1.1 土壤水分运动基本方程

假设各层土壤为均质、各向同性的刚性多孔介 质,不考虑气相及温度对水分运动的影响,滴灌二维 水分运动的控制方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(x, z, h)$$
(2)

式中 x----横向坐标, cm



图 1 棉花种植和滴灌带布置模式

Fig. 1 Schematic diagram of the cropping pattern and lateral layout of the driplines under plastic mulch for cotton

式中





2.1.2 土壤氮素运移的基本方程

用对流-弥散型方程描述氮素的运移过程。无 机态氮之间的转化过程包括尿素水解、NH⁺-N 硝化 作用和 NO, -N 反硝化作用,均用一阶反应动力学方 程描述,有机氮的矿化用零阶反应动力学方程描述。 另外,还需考虑土壤对 NH⁺-N 的吸附和根系对 NO、-N、NH4+N的吸收。滴灌线源二维溶质运移方 程为[16]

$$\begin{cases} \frac{\partial\theta c_{1}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{1}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{1}}{\partial z} \right) + \frac{1}{x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{1}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{1}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{1}}{\partial z} \right) - \\ \left(\frac{\partial q_{x}c_{1}}{\partial x} + \frac{q_{x}c_{1}}{x} + \frac{\partial q_{z}c_{1}}{\partial z} \right) - k_{1}\theta c_{1} \\ \frac{\partial\theta c_{2}}{\partial t} + \frac{\partial ps}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{2}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{2}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c_{2}}{\partial x} + \theta D_{zz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) + \\ \theta D_{xz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial q_{x}c_{2}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c_{2}}{\partial x} + \theta D_{zz} \frac{\partial c_{2}}{\partial z} \right) + \\ k_{0}\rho + k_{1}\theta c_{1} - k_{2}\theta c_{2} - k_{2}\rho s - S_{c}c_{2} \\ \frac{\partial \theta c_{3}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{3}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{3}}{\partial z} \right) + \frac{1}{x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c_{3}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{3}}{\partial z} \right) - \\ \left(\frac{\partial q_{x}c_{3}}{\partial x} + \frac{q_{x}c_{3}}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c_{3}}{\partial z} \right) + k_{2}\theta c_{2} + k_{2}\rho s - \\ k_{3}\theta c_{3} - S_{c}c_{3} \\ s = k_{d}c_{2} \end{cases}$$

$$(3)$$

$$c_1$$
 ——尿素态氮质量浓度,mg/cm³
 c_2 ——NH₄⁺-N质量浓度,mg/cm³
 c_3 ——NO₃⁻-N质量浓度,mg/cm³
 q_x ——x 方向上的土壤水通量,cm/h
 q_z ——z 方向上的土壤水通量,cm/h
 S_c ——作物根系吸氮源汇项,mg/(cm³·h)
 k_0 ——有机质矿化速率,取 0.000 03 h^{-1[17]}
 k_d ——NH₄⁺-N 吸附速率,取 0.003 5 cm³/mg^[18]
 k_1 ——尿素水解速率,取 0.023 h^{-1[18]}
 k_2 ——NH₄⁺-N 硝化速率,取 0.005 h^{-1[18]}
 k_3 ——NO₃⁻-N 反硝化速率,取 0.000 2 h^{-1[18]}
 p ——土壤干容重,mg/cm³
 D_{xx} 、 D_{xz} 、 D_{zz} ——水动力弥散系数张量的分
量,cm²/h

2.2 初始和边界条件

假设各层土壤初始水氮含量沿水平方向均匀分 布,则土壤水氮运移的初始条件为

$$\begin{cases} \theta_{i}(x,z) = \theta_{0i} & (0 \le x \le X, \ z_{id} \le z \le z_{iu}, \ t = 0) \\ c_{i}(x,z) = c_{0i} & (0 \le x \le X, \ z_{id} \le z \le z_{iu}, \ t = 0) \end{cases}$$

$$(4)$$

1. 1 日本

式中
$$i$$
——土壤层数
 θ_i ——第 i 层土壤含水率
 c_i ——第 i 层土壤 NH₄⁺-N 或 NO₃⁻-N 质量浓
度,mg/cm³
 θ_{0i} —— θ_i 的初始值
 c_{0i} —— c_i 的初始值
 z_{iu} ——第 i 层土壤上边界的垂向坐标,cm

 z_{id} ——第 i 层土壤下边界的垂向坐标, cm

灌水器处(x = 0 cm,z = 150 cm)采用定流量边 界;由于模拟时段较长,因此忽略灌水过程中饱和区 宽度随时间的变化,假设饱和区宽度为定值W,通过 田间试验观测取为 20 cm。饱和区在灌水过程中为 不随时间变化的定流量边界,不灌水时为零通量边 界。上边界其余部分覆膜区域为零通量边界,而未 覆膜区域为大气边界。饱和区内流量和溶质浓度边 界条件为

$$\begin{cases} -K(h)\frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = \sigma(t) & (0 \le x \le W, \ z = 150, \ 0 < t < T) \\ -\left(\theta D_{xx}\frac{\partial c_1}{\partial x} + \theta D_{xz}\frac{\partial c_1}{\partial z}\right) + q_x c_1 = q_x C_a & (0 \le x \le W, \ z = 150, \ 0 < t < T) \\ -\left(\theta D_{zz}\frac{\partial c_1}{\partial z} + \theta D_{xz}\frac{\partial c_1}{\partial x}\right) + q_z c_1 = q_z C_a & (0 \le x \le W, \ z = 150, \ 0 < t < T) \end{cases}$$

$$(5)$$

式中 C_a ——肥料溶液尿素态氮质量浓度,mg/cm³ T----灌水历时,h

根据灌水器流量、饱和区宽度和灌水器间距进 行计算

$$\sigma(t) = \frac{Q}{2WL_e} \tag{6}$$

式中 Q---灌水器流量, cm³/h

W——模拟区域饱和区宽度,cm

L_e——滴灌带的灌水器间距, cm

 $t > T \ {\rm fr} \ \sigma(t) = 0_{\circ}$

模拟计算区域左、右边界(x = 0 和 x = 72.5 cm)为 零通量边界;下边界(z = 0 cm)为自由排水边界。

2.3 作物蒸腾速率

本研究中潜在蒸腾速率与棉花蒸发蒸腾速率的 比例参照文献[19],即

$$T_{p}/E_{T_{p}}(t) = 1 - \exp(-0.39L_{AI})$$
(7)

- 式中 L_{AI}——棉花叶面积指数,通过田间试验每个 生育期实测的 4 次 L_{AI}数据拟合得出 L_{AI}与播种后天数的关系式(初始 L_{AI} 为零),利用该关系式计算各模拟时 段的 L_{AI}
 - *E*_{*T_p}(<i>t*) 棉花的蒸发蒸腾速率,根据参考 作物腾发速率乘以作物系数计算</sub>

2.4 作物根系吸水函数

根系吸水函数 S(x,z,h)参照文献[20]计算

$$\begin{cases} S(x,z,h) = \alpha(x,z,h) b(x,z_1) L_t T_p \\ z_1 = 150 - z \end{cases}$$
(8)

式中 $\alpha(x,z,h)$ —土壤水分胁迫函数

b(x,z1)——相对根系密度分布函数

L₁——根区宽度,取72.5 cm

 $T_{\rm m}$ ——作物蒸腾速率, cm/h

模拟作物为棉花,土壤水分胁迫函数 $\alpha(x,z,h)$ 随根区土壤负压水头 h 变化的计算模型参照文献[21],模拟计算中 h_1 、 h_2 、 h_{3high} 、 h_{3low} 和 h_4 分别为 – 10、– 25、– 200、– 6 000和– 14 000 hPa。

新疆棉花为密植,可假设 b(x,z₁)沿水平方向 均匀分布,因此根系密度分布函数 b(x,z₁)可以简 化为 $b(z_1)$,计算公式为^[22]

$$b(z_{1}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{z_{1}}{z_{1m}}\right) e^{-\frac{p_{z}}{z_{1m}}|z_{1}^{*} - z_{1}|} & (0 \le z_{1} \le 50) \\ 0 & (50 < z_{1} \le 150) \end{cases}$$
(9)

式中 z_{1m} — 垂向根系分布最大距离,取 50 cm z₁^{*} — 垂向根系密度最大处对应的垂向坐 标,取 5 p. — 经验参数,取 1. 6^[23]

3 模型率定和验证

利用 2010 年棉花花期(7月18日—8月20日) C311、C312和 C313处理的试验数据对模型参数进 行率定,然后利用 2011年棉花花期(7月21日— 8月21日)C311、C312和 C313处理试验数据对模型 进行验证。含水率和氮素监测点布置方式与田间试 验相同,各处理小区均布置7个模拟点。田间试验 数据包括 Trime - FM 监测的土壤含水率和取土测定 的土壤 NO₃-N 含量。NO₃-N 质量浓度计算公式 为^[24]

$$C_w = \frac{C_s \gamma}{1\ 000\theta} \tag{10}$$

式中 C_w ——土壤溶液中 NO₃⁻-N 质量浓度,mg/cm³

C_s——风干土样的 NO₃⁻-N 质量比, mg/kg

γ----土壤容重,g/cm³

3.1 模型率定

土壤水分特征曲线参数和非饱和导水率采用 van Genuchten 模型^[25]表示,该模型中具有5个水力 参数 θ_r 、 θ_s 、 α 、n和 K_s ,初始值利用田间实测的土壤 颗粒组成和容重,由 Rosetta人工神经网络模型求 得^[26],列于表1。

溶质运移参数主要包括纵向弥散系数 D_L 、横向弥散系数 D_T 及自由水中的分子扩散系数 D_W 。模拟中试验土壤的纵向弥散系数初始值取 $D_L = 0.3$ cm, 横向弥散系数初始值取 $D_T = D_L/10$,即 0.03 cm^[27]; 尿素态氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 在自由水中的分子扩 散系数初始值取 0.03、0.06 和 0.06 cm²/h^[28-29]。

表1 试验用土壤水力特性参数初始和率定结果

Tab. 1 Initial and calibrated hydraulic parameters of the experimental soils

深度	凋萎含水率 θ_r		饱和含水率 θ_s		形状系数 α/cm ⁻¹		形状系数 n		饱和渗透系数 K _s /(cm·h ⁻¹)	
/cm	初始	率定	初始	率定	初始	率定	初始	率定	初始	率定
0 ~ 20	0.046	0.047	0.383	0.402	0.004	0.004	1.547	1.527	0.523	0.963
$20 \sim 40$	0.049	0.050	0.385	0.403	0.003	0.004	1.562	1.546	0.501	0.948
$40 \sim 60$	0.050	0.051	0.384	0.418	0.003	0.005	1.568	1.536	0.444	1.540
60 ~ 80	0.051	0.052	0.382	0.415	0.003	0.004	1.571	1.547	0.412	1.453
80 ~ 150	0.052	0.052	0.391	0.407	0.004	0.004	1.567	1.554	0.619	1.146

对比分析 2010 年 C3I1、C3I2 和 C3I3 处理 0 ~ 100 cm 土壤含水率均值的实测值和模拟值,相应地 调整各土层的水力特性参数,使各处理各土层含水 率的模拟值和实测值较好吻合。以 C3I2 处理为例

(图 3),可以看出,土壤含水率模拟值较好反映了实测值的变化趋势。率定处理模拟值和实测值的均方 根误差均小于 0.01,平均相对误差的绝对值均小于 10%。土壤水力特性参数的率定结果见表 1。



图 3 2010 年棉花花期不同深度土壤含水率均值模拟值和实测值的比较(模型率定) Fig. 3 Comparison between the simulated soil water content and the measured value at different depths during the bloom stage of cotton (model calibration) in 2010

(a) 0~20 cm 深度 (b) 20~40 cm 深度 (c) 40~60 cm 深度 (d) 60~80 cm 深度 (e) 80~100 cm 深度

根据 2010 年 8 月 12 日土壤剖面 NO₃⁻-N 质量 浓度模拟值和实测值的比较,调整溶质运移参数,使 C311、C312 和 C313 处理的土壤剖面 NO₃⁻-N 质量浓 度模拟值与实测值尽可能接近(图 4)。率定处理的模 拟值和实测值的均方根误差均小于 0.01 mg/cm³,平均 相对误差的绝对值均小于 20%。率定后土壤的纵 向弥散系数取 $D_L = 5$ cm,横向弥散系数取 $D_T = D_L/10$, 即 0.5 cm;有机质矿化速率 k_0 取 0.000 03 h⁻¹;尿素 水解速率 k_1 、NH⁴₄ -N 硝化速率 k_2 和 NO₃⁻-N 反硝化 速率 k_3 分别取值 0.019、0.008 和 0.003 h⁻¹。

3.2 模型验证

图 5 对比了 2011 年 C3I2 处理 0~100 cm 土壤 含水率均值的模拟值与实测值, C3I1 和 C3I3 处理 的结果与之类似。从图中可知,随着灌水的进行, 0~60 cm 土壤含水率持续增加,在灌水结束后随着





作物根系吸收和土壤蒸发,又逐渐降低。0~60 cm 土壤含水率波动幅度随土壤深度增加而减小。 80~100 cm深度土壤含水率均值在模拟时段内变化



图 5 2011 年棉花花期不同深度土壤含水率均值模拟值和实测值的比较(模型验证) Fig. 5 Comparison between the simulated soil water content and the measured value at different depths during the

2011 bloom stage of cotton (model validation)

(a) 0~20 cm 深度 (b) 20~40 cm 深度 (c) 40~60 cm 深度 (d) 60~80 cm 深度 (e) 80~100 cm 深度

较平稳,受灌水的影响较小,这主要是由于灌溉计划 湿润深度低于 60 cm。60~100 cm 深度土壤含水率 实测值的标准偏差略高于 0~60 cm 深度,各测点土 壤质地差异以及可能存在的大孔隙优先流是导致这 一现象的原因。从表 2 可以看出,模拟值和实测值 的均方根误差的变化范围为 0.007~0.041,平均相 对误差的绝对值大部分小于 10% (C311 处理 60~ 80 cm 深度和 C313 处理 0~40 cm 深度除外),土壤

表 2 土壤含水率模拟值和实测值的均方根误差和 平均相对误差

Tab. 2 Root mean square error and average relative error for the simulated and measured soil water content

深度	C3I1		(2312	C3 I3				
/cm	均方根	平均相	均方根	平均相	均方根	平均相			
	误差	对误差/%	误差	对误差/%	误差	对误差/%			
0 ~ 20	0.010	-0.4	0.023	- 8.65	0.041	- 15.6			
$20 \sim 40$	0.011	-4.1	0.018	- 5. 68	0.033	- 12.6			
$40\sim 60$	0.015	- 5.7	0.007	1.56	0.024	-9.3			
60 ~ 80	0.028	-11.6	0.021	- 8.83	0.025	- 10. 2			
80 ~ 100	0.017	- 6. 9	0.016	- 6. 89	0.012	3.7			

含水率均值的模拟值与实测值吻合良好。

图 6 对比了土壤剖面 NO₃⁻-N 质量浓度的模拟 值和实测值(2011 年 8 月 7 日取样)。可以看出,与 田间试验结果类似,土壤 NO₃⁻-N 质量浓度随灌水量 增加而减小。C3I2 和 C3I3 处理土壤剖面 NO₃⁻-N 质量浓度的模拟值和实测值差异不大(均方根误差 分别为 0.027 和 0.073 mg/cm³),C3I1 处理模拟值和 实测值存在较大差异(均方根误差 0.416 mg/cm³),特 别是表层土壤。这可能是由于田间试验取样在窄行



(model validation)

113

L/h

标准差

0.99

0.50

0.13

定程度的水分亏缺,所以选择中灌溉水平(I2)进行

模拟,灌溉施肥制度参照文献[5]的2011年试验信息。模拟的毛管长度为50m(灌水器间距30cm),

分成56段。每段毛管包括3个相同流量的灌水器。

模拟所用的气象资料采用 2011 年 7 月 21 日至 8 月

流量的统计特征值

standard deviation of the emitter discharge for each

drip uniformity treatment

最小值

0.61

1.23

1.83

数随时间的变化。随着不均匀灌水的进行,中、低滴

灌均匀系数处理的土壤含水率均匀系数呈下降趋

势,灌水结束后,随着作物根系吸收和土壤蒸发,又

图7给出了各处理棉花花期土壤含水率均匀系

与滴灌均匀系数 C₂设计值对应的灌水器

Summary of maximum, minimum, mean and

均值

2.10

2.10

2.10

21 日之间的实测值,在该时段棉花处于花期。

表 3

Tab. 3

 C_u

0.60

0.80

0.95

最大值

3.65

2.87

2.40

进行,在低灌溉水平下(II),灌水很难到达窄行,导 致取样测得的土壤 NO₃-N 质量浓度在很大程度上 取决于初始土壤 NO₃-N 质量浓度,不均匀的初始土 壤 NO₃-N 质量浓度分布可能是导致 8 月 7 日取样 土壤 NO₃-N 质量浓度分布不均匀的主要原因。综 合以上分析,本文构建的干旱区棉花膜下滴灌水氮 运移模型是可靠的。

4 模型应用

模拟中滴灌均匀系数设置 0.60、0.80 和 0.95 三水平(简记为 C1、C2 和 C3,即低、中和高滴灌均 匀系数)。给定灌水器流量的均值和标准差,利用 Monte - Carlo 方法^[30]产生 56 种灌水器流量,然后计 算滴灌均匀系数,与滴灌均匀系数设计值对应的灌 水器流量的统计特征值列于表 3。考虑到地形平坦 和灌水器制造偏差较小时,田间滴灌系统主要受水 力偏差的影响,1 根毛管的灌水器流量沿毛管方向 总体呈降低趋势^[31],相邻管段的灌水器流量比较接 近,因此假设土壤水分在各管段之间不存在交换。 新疆干旱区灌溉水比较缺乏,作物可能经常遭受一

持续增加。灌水结束后土壤含水率均匀系数的增加 1.0 0.9 0.9 含水率均匀系数 含水率均匀系数 0.8 0.8 0.7 0.7 0.6 0.6 C3 - C3 $\cdot C2$ 0.5 0.5 100 400 700 800 700 200 300 500 600 0 100 200 300 400 500 600 800 时间/h 时间/h (b) (a) 1.0 1.00.9 0.9 含水率均匀系数 含水率均匀系数 0.8 0.8 0.7 0.7 0.6 ·C2 - C3 0.6 C1 C^{2} - - C3 0.5 0.5 100 200 300 400 500 600 700 800 100 200 300 400 500 600 700 800 0 时间/h 时间/h (c) (d) 1.00.9 含水率均匀系数 0.8 0.7 0.6 0.5 100 200 300 400 500 600 700 800 0 时间/h (e)

图 7 棉花花期(2011 年 7 月 21 日至 8 月 21 日)不同深度土壤含水率均匀系数随时间的变化 Fig. 7 Uniformity coefficient of the soil water content at different depths during the bloom

stage of cotton (from 21 July to 21 August 2011)

(a) 0~20 cm 深度 (b) 20~40 cm 深度 (c) 40~60 cm 深度 (d) 60~80 cm 深度 (e) 80~100 cm 深度

速率随土壤深度增加而减少,根系分布密度随土壤 深度增加而减少可能是导致这一现象的主要原因。 滴灌均匀系数越低,灌水后土壤含水率均匀系数降 低的幅度越大。总的来看,在模拟时段内低滴灌均 匀系数处理土壤含水率整体呈下降趋势,而高滴灌 均匀系数处理变化较平稳,如0~20 cm 深度 C1 和 C3 处理模拟末期土壤含水率均匀系数与模拟初期 相比分别降低了13.6%和1.5%。C1、C2和C3处 理土壤含水率均匀系数的变化范围分别为0.66~ 1.00、0.86~1.00和0.97~1.00,随滴灌均匀系数 增加而增大。土壤含水率均匀系数在模拟时段内的 波动幅度随滴灌均匀系数的增加而减小,如0~ 20 cm深度 C1、C2和C3处理土壤含水率均匀系数 的变差系数分别为0.05、0.02和0.01。

为了分析土壤空间变异对土壤水氮分布的影响 程度,比较了无土壤空间变异条件下土壤含水率模 拟结果与 2011 年田间试验 Trime - FM 监测结果 (表4)。可以看出,各土层土壤含水率均值的模拟值 和实测值相差不大,平均相对误差均小于 10% (C1 处理 20~40 cm 除外)。土壤含水率均匀系数实测 值均低于模拟值(C1 处理 0~20 cm 除外)。例如 Trime - FM 监测的 0 ~ 20 cm 深度 C1、C2 和 C3 处理 花期土壤含水率均匀系数均值分别为 0.91、0.89 和 0.93,C1 处理的实测值与模拟值差异不大,而 C2 和 C3 处理均低于模拟值,田间试验存在的土壤空间变 异可能是导致这一现象的主要原因。

图8给出了各处理棉花花期土壤 NO₃-N 质量

表 4 棉花花期(2011 年 7 月 21 日至 8 月 21 日) 中灌溉水平下土壤含水率的均值和 均匀系数模拟值与实测值的比较

Tab. 4 Comparison between the simulated mean and uniformity coefficient of soil water content and the measured values at different depths for the medium irrigation level during the bloom stage of cotton (from 21 July to 21 August 2011)

***	深度		实测值		模拟值			
1日 7小	/cm	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
	$0 \sim 20$	0.22	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21	
均值	$20\sim\!40$	0.24	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21	
	$40\sim 60$	0.23	0.24	0.20	0.21	0.21	0.21	
	$0 \sim 20$	0.91	0.89	0.93	0.90	0.95	0. 99	
均匀系数	$20\sim\!40$	0.87	0.86	0.94	0.90	0.95	0.99	
	$40\sim 60$	0.82	0.84	0.92	0.92	0.96	0.99	



图 8 棉花花期(2011 年 7 月 21 日至 8 月 21 日)不同深度土壤 NO₃⁻-N 质量浓度均匀系数随时间的变化
Fig. 8 Uniformity coefficient of the soil nitrate at different depths during the bloom stage of cotton (from 21 July to 21 August 2011) (a) 0 ~ 20 cm 深度 (b) 20 ~ 40 cm 深度 (c) 40 ~ 60 cm 深度 (d) 60 ~ 80 cm 深度 (e) 80 ~ 100 cm 深度

115

浓度均匀系数随时间的变化。随着不均匀灌水的进 行,中、低滴灌均匀系数处理的土壤 NO₃-N 质量浓 度均匀系数急剧下降,灌水施肥结束后,随着作物对 养分的吸收,又持续增加。灌水后土壤 NO,-N 质量 浓度均匀系数降低幅度随滴灌均匀系数的减小而增 加。模拟时段内低滴灌均匀系数处理土壤 NO₄-N 质量浓度均匀系数整体呈下降趋势,而高滴灌均匀 系数处理变化较平稳,如0~20 cm 深度 C1 和 C3 处 理模拟末期土壤 NO,-N 质量浓度均匀系数与模拟 初期相比分别降低了 46.3% 和 4.5% 。土壤 NO3-N 质 量浓度均匀系数在模拟时段内的波动幅度随土壤深 度增加而减小。对滴灌来说,氮肥随灌溉施入,灌水 不均匀导致土壤 NO, -N 质量浓度分布不均匀是产 生这一现象的主要原因。模拟时段内土壤 NO₃-N 质量浓度均匀系数的变差系数随滴灌均匀系数增加 而减小,如0~20 cm 深度 C1、C2 和 C3 处理土壤 NO₃-N 质量浓度均匀系数的变差系数分别为 0.22、 0.08 和 0.02。模拟时段内 C1、C2 和 C3 处理土壤 NO, -N质量浓度均匀系数的变化范围分别为 0.35~1.00、0.69~1.00 和 0.93~1.00,明显低于 土壤含水率均匀系数,尤其是 C1 和 C2 处理。田间 试验也得出了类似的结论[3-5]。

表 5 对比了 2011 年 8 月 7 日取样土壤 NO₃⁻-N 质量浓度均值和均匀系数的模拟值与实测值。总的 来看,土壤 NO₃⁻-N 质量浓度的模拟值和实测值存在 一些差异,表层土壤的实测值高于模拟值,而下层土 壤正好相反。土壤 NO₃⁻-N 质量浓度均匀系数模拟 值高于实测值(C1 处理 0 ~ 40 cm 除外),尤其是 C2 和 C3 处理。例如,C3 处理 0 ~ 20 cm 土壤 NO₃⁻-N 质量浓度均匀系数的模拟值比实测值高 71%。这 一结果表明,田间试验存在的土壤空间变异在一定 程度上增加了土壤 NO₃⁻-N 质量浓度分布不均匀性。

土壤水氮分布均匀性不仅受毛管上灌水器流量 大小(滴灌均匀系数)的影响,还取决于灌水器间 距、灌水定额等因素。本研究滴灌作物为行播作物 棉花,灌水器间距 30 cm,灌水/施肥后单个灌水器 形成的湿润体会充分叠加,水分和养分在土壤中沿 水平和垂直方向的再分布在很大程度上消弱了灌 水/施肥不均匀对水氮分布的负面影响。然而,对于 果树滴灌来说,由于果树的株距和行距多在数米范 围内,这种情况下滴灌均匀性的影响可能强于行播 作物。另外,较大的灌水定额使各灌水器形成的湿 润体叠加,在一定程度上也会改善土壤水氮分布均 匀性。

表 5 2011 年 8 月 7 日中灌溉水平下土壤 NO₃⁻-N 质量 浓度的均值和均匀系数模拟值与实测值的比较

Tab. 5 Comparison between the simulated mean and uniformity coefficient of soil nitrate and the measured values for the medium irrigation level at different depths on 7 August 2011

	资产		实测值		模拟值		
1百 1小	休度/ cm	C1	C2	C3	C1	C2	C3
	$0 \sim 20$	0.23	0.15	0.17	0.16	0.12	0.12
均值	$20\sim 40$	0.12	0.13	0.14	0.18	0.18	0.18
	$40\sim 60$	0.11	0.04	0.08	0.11	0.11	0.11
	0 ~ 20	0.60	0.71	0.56	0.50	0.81	0.96
均匀系数	$20\sim 40$	0.90	0.80	0.81	0.81	0.87	0.97
	$40\sim 60$	0.72	0.74	0.19	0.83	0.88	0.96

5 结论

(1) 基于 HYDRUS - 2D 软件建立了棉花膜下 滴灌水氮运移模型,利用棉花膜下滴灌试验数据对 模型进行了参数率定和验证,结果表明模拟期内土 壤含水率均值模拟值与实测值基本一致,土壤 NO₃-N质量浓度比较吻合。

(2)利用验证后的数学模型研究了干旱区不同 滴灌均匀系数时土壤水氮分布特征。结果表明随着 灌水的进行,滴灌均匀系数 C_u 为 0.60 和 0.80 时, 土壤含水率和 NO_3^- -N 质量浓度均匀系数均呈下降 趋势,而 $C_u = 0.95$ 时的变化较平稳;滴灌均匀系数 越低,灌水后土壤含水率和 NO_3^- -N 质量浓度均匀系 数降低的幅度越大;土壤 NO_3^- -N 质量浓度均匀系数 的变化范围为 0.35 ~ 1.00,低于土壤含水率均匀系 数(0.66 ~ 1.00)。

(3)通过对比水氮模拟结果与田间试验结果, 评估了土壤空间变异对水氮分布均匀性的影响。结 果表明田间试验存在的土壤空间变异在一定程度上 增加了土壤水氮分布不均匀性。

参考文献

1 陈渠昌.滴灌均匀度的模拟研究[D].北京:北京农业工程大学,1993.

- 2 ASAE EP405.1. Design and installation of microirrigation systems [S]. ASAE, 2003.
- 3 李久生,尹剑锋,张航,等.滴灌均匀系数对土壤水分和氮素分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):27-33.
 Li Jiusheng, Yin Jianfeng, Zhang Hang, et al. Field evaluation of drip fertigation uniformity effects on distributions of water and

Chen Quchang. Simulation of drip irrigation uniformity [D]. Beijing: Beijing Agricultural Engineering University, 1993. (in Chinese)

nitrate in soil[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 27-33. (in Chinese)

- 4 张航,李久生.华北平原春玉米滴灌均匀系数对土壤水氮时空分布的影响[J].中国农业科学,2012,45(19):4004-4013. Zhang Hang, Li Jiusheng. The effects of drip irrigation uniformity on spatial and temporal distributions of water and nitrogen in soil
- for spring maize in North China Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(19): 4004 4013. (in Chinese)
- 5 关红杰,李久生,栗岩峰. 干旱区滴灌均匀系数和灌水量对土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(24):121-128. Guan Hongjie, Li Jiusheng, Li Yanfeng. Effects of uniformity and irrigation amount of drip system on distributions of soil water and nitrogen in arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 121-128. (in Chinese)
- 6 李久生,尹剑锋,张航,等. 滴灌均匀系数和施氮量对白菜生长及产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011,27(1):36-43. Li Jiusheng, Yin Jianfeng, Zhang Hang, et al. Effects of drip fertigation uniformity and nitrogen application level on growth, yield and quality of Chinese cabbage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 36-43. (in Chinese)
- 7 张航,李久生.华北平原春玉米生长和产量对滴灌均匀系数及灌水量的响应[J].农业工程学报,2011,27(11):176-182. Zhang Hang, Li Jiusheng. Response of growth and yield of spring corn to drip irrigation uniformity and amount in North China Plain [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 176-182. (in Chinese)
- 8 Bordovsky J P, Porter D O. Effect of subsurface drip irrigation system uniformity on cotton production in the Texas high plains [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(4): 465 - 472.
- 9 陈渠昌,郑耀泉. 微灌工程设计灌水均匀度的选定[J]. 农业工程学报,1995,11(2):128-132. Chen Quchang, Zheng Yaoquan. Optimizing determination of irrigation uniformity in the design of micro-irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(2): 128-132. (in Chinese)
- 10 Wu I P, Barragan J. Design criteria for microirrigation systems [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1145-1154.
- 11 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, United Nations-FAO. Rome, Italy, 1998.
- 12 Nakayama F S, Bucks D A, Clemmens A J. Assessing trickle emitter application uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(4): 816-821.
- 13 裴鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用[M]. 北京:海洋出版社, 1998.
- 14 Skaggs T H, Trout T J, Simunek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4): 304 - 310.
- 15 冯绍元,丁跃元,曾向辉.温室滴灌线源土壤水分运动数值模拟[J].水利学报,2001,32(2):59-64. Feng Shaoyuan, Ding Yueyuan, Zeng Xianghui. Numerical simulation of soil water content movement under drip irrigated linear resource[J]. Journal of Hydraulic Engieering, 2001, 32(2): 59-64. (in Chinese)
- 16 Simunek J, Sejna M, van Genuchten M T. HYDRUS-2D simulating water flow, heat, and solute transport in two-dimensional variably saturated media[M]. Riverside CA: International Ground Water Modeling Center, 1999.
- 17 刘培斌,丁跃元,张瑜芳.田间-维饱和-非饱和土壤中氮素运移与转化的动力学模式研究[J].土壤学报,2000,37(4):
 490-498.
 - Liu Peibin, Ding Yueyuan, Zhang Yufang. The study of 1-dimension satuated-unsaturated mathematical model of nitrogen transport and transformtion for the field conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 490-498. (in Chinese)
- 18 Ling G, EI-Kadi A I. A lumped parameter model for nitrogen transformation in the unsaturated zone [J]. Water Resources Research, 1998, 34(2): 203-212.
- 19 孙林,罗毅. 膜下滴灌棉田土壤水盐运移简化模型[J]. 农业工程学报,2012,28(24):105-114. Sun lin, Luo yi. Simplified model on simulating soil water and salt transfer process under drip irrigation in cotton yield[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 105-114. (in Chinese)
- 20 Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of field water use and crop yield [M]. Wageningen, Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978.
- 21 Taylor S A, Ashcroft G M. Physical edaphology[M]. San Francisco: Freeman and Co., 1972.
- 22 Vrugt J A, Van Wijk M T, Hopmans J W, et al. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling[J]. Water Resources Research, 2001, 37(10): 2457 2470.
- 23 虎胆·吐马尔白,王一民,牟洪臣,等. 膜下滴灌棉花根系吸水模型研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):66-70. Hudan·Tumarbay, Wang Yimin, Mu Hongchen, et al. Root water uptake model in drip irrigation under mulched film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 66-70. (in Chinese)
- 24 宿梅双.喷灌均匀系数对土壤水氮淋失及作物生长影响的田间试验研究[D].北京:中国农业大学,2005. Su Meishuang. Effects of sprinkler uniformity on leaching of water and nitrate and crop growth[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 25 van Genuchten M T. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 898.
- 26 Schaap M G, Leij F J, van Genuchten M T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3-4): 163-176.
- 27 Ajdary K, Singh D K, Singh A K, et al. Modeling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation [J].

Agricultural Water Management, 2007, 89(1-2): 15-28.

- 28 Ma L, Lindau C W, Hongprayoon C, et al. Modeling urea, ammonium, and nitrate transport and transformations in flooded soil columns[J]. Soil Science, 1999, 164(2): 123 - 132.
- 29 Singh R, Nye P H. Diffusion of urea, ammonium and soil alkalinity from surface applied urea [J]. European Journal of Soil Science, 1984, 35(4): 529-538.
- 30 David W D, Raymond P C, Peter G M. Development of Bayesian Monte Carlo techniques for water quality model uncertainty [J]. Ecological Modeling, 1992, 62(3): 149 - 162.
- 31 Lamm F R, Ayars J E, Nakayama F S. Microirrigation for crop production: design, operation, and management[M]. Elsevier Publications, 2007.

Modeling Distributions of Water and Nitrate in Soil as Affected by Drip System Uniformity under Arid Conditions

Guan Hongjie Li Jiusheng Li Yanfeng

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A model simulating the transport of water and nitrate in soil under mulched drip irrigation of cotton was established and solved numerically by using the HYDRUS – 2D package. The model was calibrated and validated by the field experiments conducted in Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, during the cotton growing seasons of 2010 and 2011. The emitter discharge rates that progressively decreased from the inlet to the distal end along the dripline were discretized as a series of sequential segments each having an equal discharge rate. Assuming no lateral exchange of water in soil between adjacent segments, the model, which had been verified, was used to evaluate the effect of drip system uniformity and soil spatial variability on the distributions of water and nitrate in soil under arid conditions. The results indicated that the uniformity coefficients of soil water content and nitrate were observed in downward trend for drip system uniformity coefficients (C_u) of 0.60 and 0.80, while a relatively stable variation pattern was observed for $C_u = 0.95$; the lower system uniformity the greater decrease in the uniformity coefficient of soil nitrate, which varied from 0.35 to 1.00, was substantially lower than that of soil water content. Meanwhile, the soil spatial variability in the experimental field increased the nonuniform distributions of the soil water and nitrate.

Key words: Cotton Drip irrigation Uniformity coefficient Soil water content Mathematical model