

地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用

许迪, 程先军

(国家节水灌溉北京工程技术研究中心)

摘要: 利用建立的地理点源土壤水运动和溶质运移数学模型描述地下滴灌条件下土壤水、肥运动的分布规律, 将土壤质地结构、滴头出流量、滴头埋深和单次灌水历时等因素对土壤水分布的影响进行模拟分析。结果表明, 在确定的土壤质地条件下, 滴头出流量和埋深是影响地下滴灌系统性能的两个最重要的灌水设计参数, 应尽量采用增加滴头数量而不是选用大流量滴头的方法来满足作物的需水要求。此外, 合理的灌溉施肥时机应依据当地的土壤质地条件予以确定。

关键词: 地下滴灌; 土壤质地结构; 滴头出流量; 滴头埋深; 灌溉施肥

中图分类号: S275.4; S275.6; S152.7+1

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0120027204

根据非饱和土壤水运动和溶质运移对流-弥散理论, 建立了地下滴灌条件下地理点源土壤水运动和溶质运移的数学模型, 利用室内试验观测资料对模型进行了验证, 对简化的滴头边界条件的可行性进行了分析^[1]。本文利用建立的数学模型, 将土壤质地结构、滴头流量、滴头埋深和单次灌水历时等因素对地下滴灌条件下土壤水分布的影响进行模拟分析, 并将施肥时机对肥料溶质在土壤中分布的影响进行初步探讨, 为地下滴灌系统的合理设计和运行提供理论依据和灌水设计参数。模拟中使用的土壤水分特征曲线 $H(h)$ 和非饱和土壤导水率 $K(h)$ 采用 VG 模型描述。溶质在自由水体中的分子扩散系数 $D_0 = 0.068 \text{ cm}^2/\text{s}$, 纵向弥散度 $E = 0.1 \text{ m}$, 横向弥散度 $E = E_0/100 = 0.001 \text{ m}$ 。参数取值详见文献 [1]。

1 灌水设计参数对土壤水分布的影响

1.1 土壤质地结构对土壤水分布的影响

分别在砂壤土、壤土以及由壤土(0~30 cm)和粘壤土(30 cm 以下)构成的非均质层状土壤条件下, 对不同土壤质地结构状况下的土壤水分布进行模拟, 其中滴头埋设在地表下 30 cm 处。影响地下滴灌条件下土壤水分布的各种因素是相互联系的。为了分析土壤质地结构单一因素对土壤水分布的作用, 模拟时做以下假设: 考虑到土壤饱和和导水率对滴头出流速度的制约, 在模拟土壤质地结构对土壤水分布的影响时, 为了将滴头流量的影响与之隔离, 假

设滴头流量与相应的土壤饱和和导水率相等(实际情况并非如此)。

图 1 给出不同土壤质地结构下土壤剖面含水率分布的模拟结果。砂壤土条件下的土壤湿润体形状呈纵向椭圆形分布, 垂向湿润深度明显大于径向湿润范围, 滴头以下湿润的土体范围明显偏大。由于砂壤土中毛细作用相对较弱, 重力作用下的水分垂向下渗能力明显强于径向水分传输能力, 故形成环绕点源的非对称椭圆形湿润圈。壤土中的土壤湿润体形状近似圆形, 径向湿润半径与垂直湿润深度基本相同, 且土壤水分向上已扩散到地表。由于此类土壤的水分传输扩散能力在所有方向上都较均匀, 故形成以点源为圆心的圆形湿润圈。在非均质层状土壤中, 由于滴头以下粘壤土的导水能力远小于滴头以上的壤土, 故大部分水分扩散到上层土壤, 只有少部分下渗。

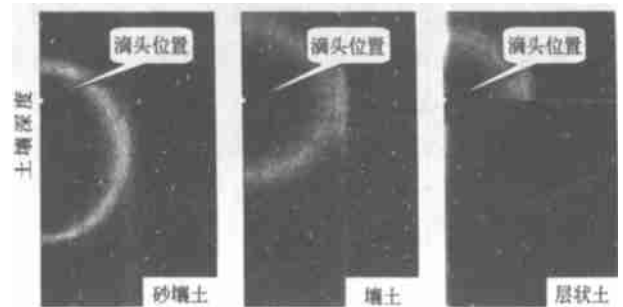


图 1 土壤质地结构对土壤水分布的影响(模拟)

Fig 1 Impact of soil texture and structure on water distribution in the soil profile

设地理点源滴灌条件下, 土壤湿润体形状受质地结构变化的影响较为明显。对于轻质土壤, 考虑到湿润土体具有非对称椭圆形湿润圈, 下渗水量远多于扩散水量, 故滴头不宜埋设过深, 以避免深层渗漏损

收稿日期: 2001207206

基金项目: “九五”国家科技重点攻关项目的部分内容(962006202201)

作者简介: 许迪, 教授级高级工程师, 博士, 副主任, 北京市车公庄西路 20 号 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 100044

失。对于导水能力相对较弱的土壤,由于水分扩散能力在所有方向上都较为均匀,可适当增加滴头埋深以便减少因地表湿润引起的土面蒸发损失。当土层内含有透水性较差的夹层时,应尽量将滴头埋置在夹层以上。在隔水层埋深较浅的状况下,若滴头埋设在隔水层以下,不利于土壤水分向上运动,而埋在隔水层以上,又会因埋深太浅致使下层土壤缺墒并阻

碍田间耕作与栽培措施的实施。此种情况下,应考虑采用其它类型的节水灌溉技术。

1.2 滴头出流量对土壤水分布的影响

图 2 给出在均质砂壤土上模拟得到的不同滴头流量(1 L öh、2 L öh 和 3 L öh)下土壤负压水头的分布趋势。其中滴头埋深在地表下 30 cm 处,模拟的土体具有相同的初始土壤含水率,灌水量均为 15 L。

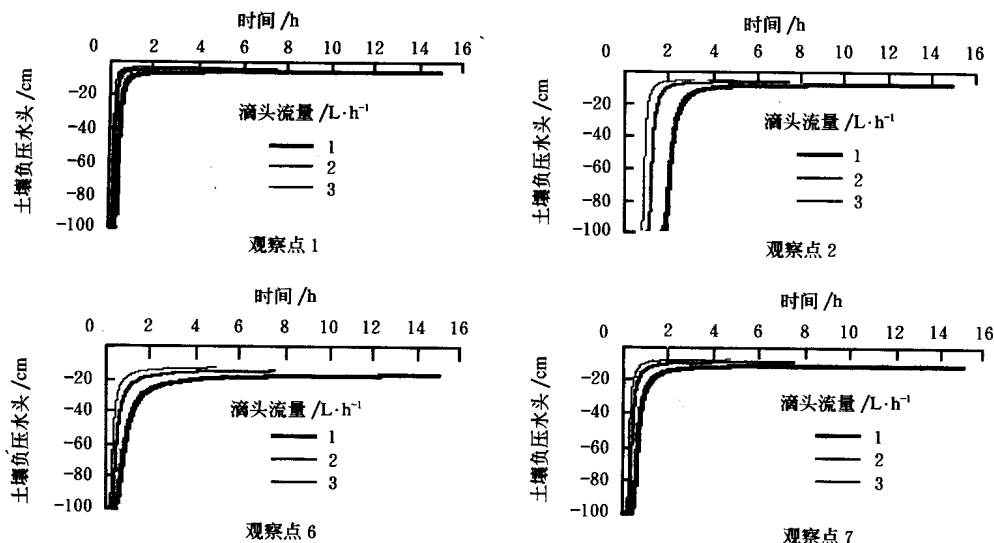


图 2 滴头出流量对土壤水分布状况的影响(模拟)

Fig. 2 Impact of discharge rate on water distribution in the soil profile

从模拟得到的土壤负压水头变化趋势可以看出,滴头附近的土壤水压力可能会接近正压,且滴头出流量越大,距离滴头越近,出现正压的可能性也越大。使用大流量滴头引起的土壤水压力有可能造成紧邻周边土壤结构的破坏,影响滴头的正常工作条件。从其它观察点处的土壤负压水头变化过程可以看出,滴头流量差异对土壤水分运动的影响主要表现在湿润峰面到达该点的时间不同。滴头出流量越大,土壤水湿润峰到达该点的时间就越快,但随着灌水时间的延长,在各观察点处由于滴头流量差异引起的土壤含水率的差别将不显著。

在选择滴头流量时,首先应以灌水出流过程中不因滴头流量过大而引起土壤结构遭到破坏或不因滴头流量远大于土壤饱和导水能力而造成滴头出流受阻为准。对较为粘重的土壤质地,应选择流量较小的滴头,而对轻质土壤,可适当选择流量稍大的滴头,其次应根据系统设计方案中制定的对作物轮灌供水量的要求和给定的灌水时间来选择滴头的规格。

1.3 滴头埋深对土壤水分布的影响

在砂壤土条件下分别对滴头埋深为 10、20 和 30 cm 等 3 种情况进行模拟,分析滴头埋深对土壤

水分布状况的影响,其中滴头出流量为 3 L öh,灌水历时 5 h,模拟的土体具有相同的初始土壤含水率。图 3 给出不同滴头埋深下的土壤水分布剖面,从图中可见,尽管土壤湿润体在形状及大小方面差别不大,但在湿润圈的分布位置上却存在着明显的差异。

滴头埋深在 10 cm 时,地表的湿润面积较大,表土水分含量过高会导致地面蒸发强度增大,土壤水分无效蒸发损失增加。滴头埋深在 30 cm 时,地表 0 ~ 15 cm 的土壤含水率未发生改变,土体湿润深度达到 75 cm。当滴头埋设在 20 cm 时,土壤湿润圈被包容在作物根系层内,顶部接近地表,底部未超出作物根层范围,不会产生较大的蒸发和渗漏损失。由此可见,滴头埋深太浅会增加地表水分的无效蒸发损失,而较大的滴头埋深,又会引起深层渗漏和表层土壤水分亏缺,不利于作物生长发育。因此,滴头埋深首先要考虑土壤质地结构,根据当地的土壤条件进行选择;其次应考虑作物的根系层深度,要尽量以毛细管上升和重力入渗所形成的土壤湿润圈正好位于根层内作为设计标准,既满足作物需水要求,又减少地面蒸发和深层渗漏量;最后滴头的埋深应以不影响田间耕作与栽培措施为原则,避免埋深过浅引起毛管和滴头遭到破坏。

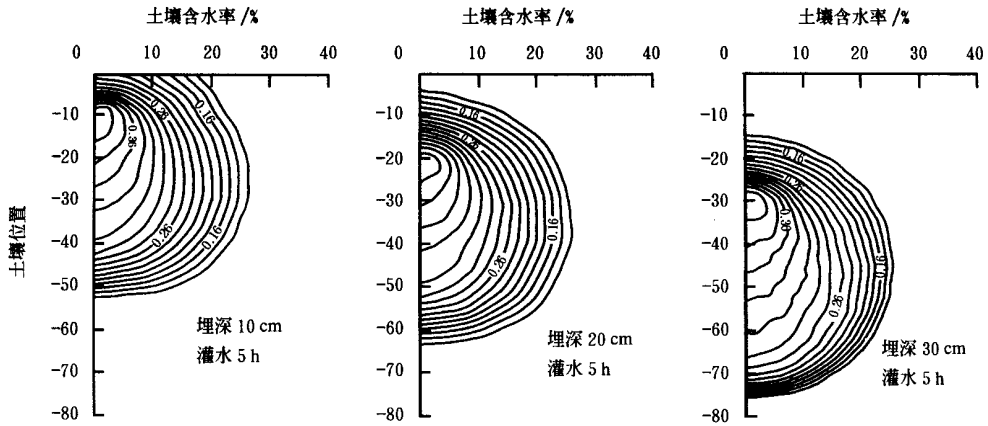


图 3 滴头埋深对土壤水分布状况的影响

Fig 3 Impact of depth of laterals on water distribution in the soil profile

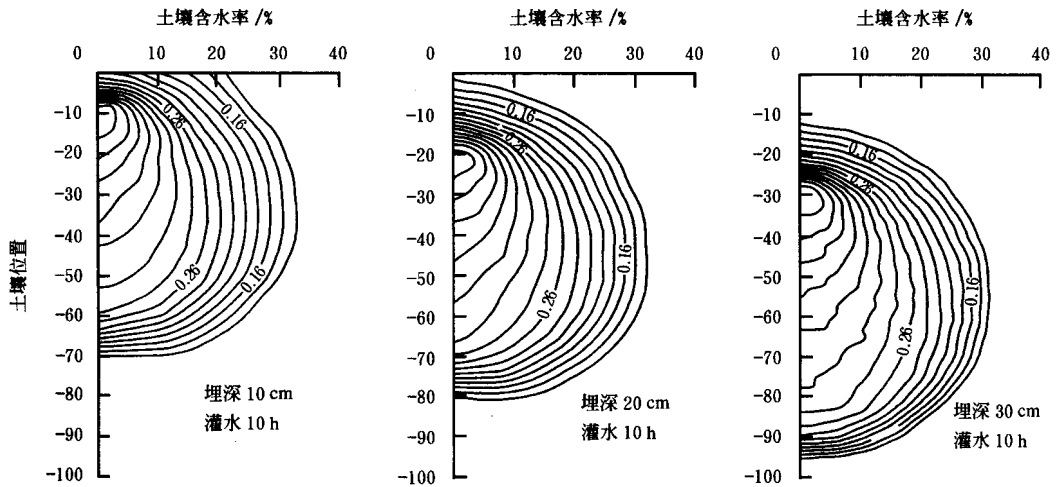


图 4 单次灌水历时对土壤水分布状况的影响

Fig 4 Impact of time lasted of a single irrigation event on water distribution in the soil profile

1.4 单次灌水历时对土壤水分布的影响

在砂壤土条件下,对 10、20 和 30 cm 等 3 种滴头埋深情况分别进行了连续灌水 5 h 和 10 h 两种单次灌水历时的模拟,分析单次灌水历时对土壤水分布状况的影响。滴头出流量为 3 L/h,模拟的土体具有相同的初始土壤含水率。从图 4 给出单次灌水历时 10 h 的模拟结果与图 3(单次灌水历时 5 h 的模拟结果)比较可见,随着灌水历时延长,土壤湿润范围向下发展的速度比径向快。以滴头埋深 20 cm 为例,灌水历时和灌水量增加 1 倍,但最大径向湿润范围只从 26 cm 增加到 30 cm 左右,增长 13%,而下渗深度却从 62 cm 增加到 82 cm 左右,增长 33%。这表明在灌水历时达到一定时间后,延长灌水时间并不能有效地增加湿润体半径,扩大土体湿润范围。若在砂壤土上通过一次灌水达到所希望的土体湿润半径时,必然会增大深层渗漏量。故在确定地下滴灌条件下的作物灌溉制度时,应采用增加灌水

次数,缩短单次灌水时间的方法,在满足作物需水量的同时,有效地提高田间灌溉效率。

2 灌溉施肥时机对土壤溶质分布的影响

利用微灌系统结合灌水进行施肥的过程,称作灌溉施肥。它可将溶解在施肥装置内的肥料通过灌水器随水分直接输送到作物根区,供作物吸收利用,与地表施肥相比,减少了施肥过程中的肥料挥发和流失量,提高了肥料的利用率。在砂壤土和壤土条件下,分别对 2 种灌溉施肥方案下(图 5)的土壤溶液溶质浓度的分布状况进行模拟。方案 a 是在灌水结束前施肥,方案 b 则是在灌水开始后即刻施肥。两个方案中使用的肥料种类(NH₄NO₃)、施肥量和施肥历时(1 h)均相同。

图 6 给出灌水结束后 5 h 时模拟的土壤溶液溶质的分布剖面。其中滴头埋深在 30 cm 处,滴头出流量 3 L/h,灌水历时 5 h。对于壤土,无论采用哪种灌

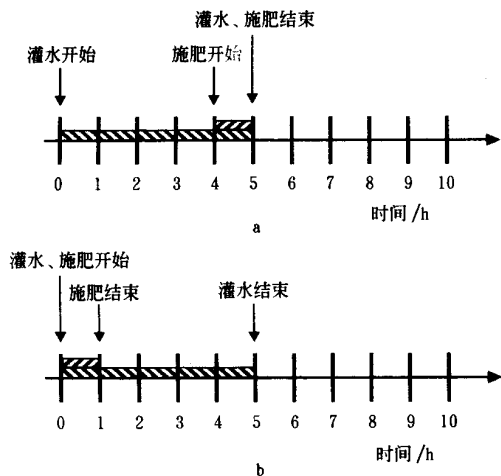


图 5 采用的两种灌溉施肥方案示意图
Fig 5 Scheme of fertigation strategies

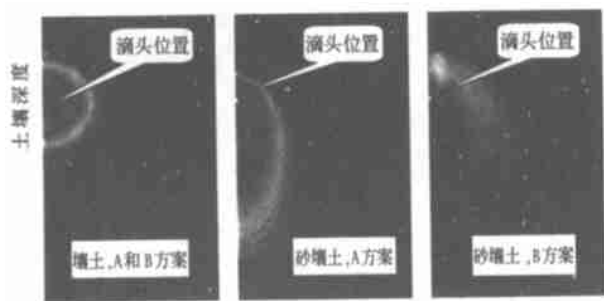


图 6 灌溉施肥时机差异对土壤溶液溶质分布的影响(模拟)
Fig 6 Impact of fertigation strategy on solute distribution in the soil profile

溉施肥方案, 溶质在土壤剖面上的分布形状都近似以滴头埋设位置为圆心的圆形, 半径约 15 cm。由于壤土中的湿润峰面在纵、横两个方向上的推进距离基本相等, 故进入土壤的肥料溶质将随着水分运动向滴头四周均匀扩散运移, 形成圆状溶质扩散圈。灌溉施肥方案对土壤溶液溶质的分布状态没有影响, 施肥时机与施肥效果无关。但在砂壤土条件下, 两种灌溉施肥方案产生的效果却存在较大差异。在 a 方案中, 溶质向下运移的趋势非常明显。施肥结束 5 h 后, 肥料已扩散到距滴头以下 60 cm 深处, 滴头上、

下土体中的肥料含量分别占总量的 7% 和 93%, 肥料流失严重。b 方案中施肥与灌水同时开始, 施肥结束 9 h 后, 肥料在土壤剖面中的分布形状近似于椭圆形。滴头上、下土体中的肥料含量各占总数的 26% 和 74%。对于滴头埋深 20 cm 的情况, 肥料在土壤剖面中的分布形状和相应施肥方案下埋深 30 cm 的情况相似, 但分布区域整体上移。

在砂壤土条件下, 与 a 方案相比, b 方案可相对减小肥料流失量。这是由于在灌水初期, 较为干燥的土壤中毛细作用对水分运动起着主导作用, 此时施肥, 肥料会在毛细管力作用下随水分向上扩散, 当灌水持续一段时间后, 随着土壤饱和程度的增加, 重力作用将支配土壤水分运动, 水分向下运动的趋势明显大于其它方向, 致使肥料随水分运动而明显下移。因此, 在砂壤土条件下, 灌溉施肥时机应选择在灌水开始时进行, 以提高肥料的利用率; 而在壤土中, 由于重力对土壤水运动的影响并不明显, 溶质随水分运动向四周运移较为均衡, 故施肥时间的选择可根据具体情况在灌水过程中任意确定。

3 结 论

本文建立的地理点源土壤水运动和溶质运移数学模型, 用来描述地下滴灌下的土壤水、肥运动分布规律, 并对土壤质地结构、滴头出流量、滴头埋深和单次灌水历时等因素对土壤水分布的影响进行模拟分析。滴头出流量和埋深是影响地下滴灌系统性能的两个较重要的参数, 而土壤质地结构又是决定滴头流量规格和适宜埋深的重要因素。模拟计算分析为地下滴灌系统的合理设计和运行提供了理论依据及适宜的灌水设计参数。对灌溉施肥时机对肥料溶质在土壤中分布的影响所进行的探讨, 有益于根据特定的土壤条件来制定科学的灌溉施肥方案, 其模拟分析结果有待于田间试验资料的进一步验证。

[参 考 文 献]

[1] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6):

were increased but not so high when the concentration of sodium polymer was raised pH value was almost not affected Ions with two positive charges, such as $[Ca^{2+}]$ and $[Mg^{2+}]$ have a negative impact on drinking water characteristic of sodium polymer markedly, which is stronger than that of one positive or negative charge, such as Na^+ and $H_2PO_4^-$. It does not influence the drinking water of sodium polymer for different concentrations of urea When soil is added with sodium polymer, the water holding capacity is raised, the aggregate of the soil is increased, this feature on sandy soil is more remarkable than that on clay soil, especially when there is 0.005% to 0.01% sodium polymer in soil The test indicated that over 90% water holding by the sodium polymer can be used by plant Based on the current results, it can be concluded that there are four aspects for action of sodium polymer, (1) conserving water by itself, (2) raising water holding by improving soil structure, (3) enhancing growth of plant and raising fertilizer use efficiency, (4) and reducing soil evaporation The field test result showed that using sodium polymer by hole method at $15 kg \cdot hm^{-2}$, the yields of corn and potato were increased by 22% and 16%, and the ratios of investment to benefit were 1:3.5 and 1:4.2, respectively. When sodium polymer was mixed with urea or with urea and phosphorus fertilizer, the urea and phosphorus fertilizer use efficiencies were increased by 18.7% and 27.1%, respectively.

Key words: aquasorb (sodium polymer); ion reaction; soil improvement; soil and water conservation; corn (*Zea mays* L.); potato (*Solanum tuberosum* L.) yield; fertilizer use efficiency

Model Application of Water Flow and Solute Transport During Non-steady Diffusion From Subsurface Emittter Source (27)

Xu Di, Cheng Xianjun (*National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research Beijing, Beijing 100044, China*)

Abstract: A model developed by the authors is used to describe flow of soil water and transport of solute during subsurface drip irrigation and fertigation Impacts on flow of water and transport of solute of factors such as soil texture and structure, discharge rate of emitters, depth of laterals and time lasted in a single irrigation are simulated Results show that for a specific soil, discharge rate of emitter and depth of lateral are, among others, two potential factors that have more powerful impacts on the performance of SDI system. To improve fertigation efficiency, appropriate strategy of fertigation should be adopted. Changing the fertigation strategy for coarse textured soils to involve application of nutrients at the beginning of an irrigation cycle can help maintain larger amounts of solute close to and above the emitter thereby making them less susceptible to leaching losses

Key words: subsurface drip irrigation; soil texture and structure; discharge rate; depth of laterals; fertigation

Visualization Methods Based on Flow Field Numerical Computation of Pumping Stations (31)

Wang Yeming^{1,2}, Tan Jianrong², Ji Yangjian² (*1. College of Water Conservancy & Architecture Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: It is a new way and method to design passageways of pumping stations by flow field numerical computation in order to optimize their hydraulic designs Based on flow field computation method, their realized methods were studied according to engineering requirements, including processing all kinds of functional curves, visualization of axial velocity for outlet section and other sections as well as reprocessing and display of 3D computation grids Using ARX of AutoCAD, all kinds of visualization functions above can be realized

Key words: passageways; flow field; pumping station; numerical calculation; visualization; computation grids; contour line

· Soil and Water Engineering ·

Adaptability of Surge Flow Irrigation Applying on Farmland (35)