

基于 Hydrus – 1D 模型的大安灌区旱田 灌溉入渗补给研究

卞建民¹, 李育松¹, 胡昱欣¹, 李宏亮^{1,2}

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130021; 2. 辽宁地质工程勘察施工集团公司, 辽宁 沈阳 110032)

摘 要: 以吉林省大安灌区为研究对象, 在野外调查和资料收集的基础上, 借助 Hydrus – 1D 模型, 模拟分析了旱田(玉米地)灌溉条件下地下水入渗补给过程。结果表明: 模拟期间蒸散发动态变化较大, 蒸腾量约为蒸发量的 2.18 倍, 玉米生育期内, 土壤水分蒸腾损失约占蒸散发消耗的 79.74%, 蒸散发在作物生长旺季以蒸腾为主, 其它时段则以蒸发为主; 旱田灌溉条件下, 降水灌溉大量入渗形成土壤水, 土壤水与地下水发生双向的、动态的水量频繁交换, 模拟中地下水入渗补给量约为 33.63 mm, 入渗比为 5.21%, 其与研究区细密的包气带介质岩性有关。研究成果可为进一步开展旱田灌溉合理方案的制定提供科学依据。

关键词: 大安灌区; Hydrus – 1D 模型; 旱田灌溉; 入渗补给

中图分类号: S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0191-05

Study on recharge from dry farmland irrigation based on the Hydrus – 1D model in Da'an irrigation district

BIAN Jian-min¹, LI Yu-song¹, HU Yu-xin¹, LI Hong-liang^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China;

2. Liaoning Geological Engineering Investigation Construction Group, Shenyang, Liaoning 110032, China)

Abstract: Based on field investigations and data collection, the process of groundwater recharge under irrigation in the dry farmland (maize field) in Da'an Irrigation District in Jilin Province was analyzed using the Hydrus – 1D model. The result shows that evapotranspiration dynamic change is evident during the simulation, transpiration is about 2.18 times of evaporation, soil water transpiration loss accounts for about 79.74% of the evapotranspiration consumption in maize growth period, the preponderance is transpiration among evapotranspiration in crop growth season, other time is e-vaporation; many precipitation and irrigation water infiltrates into soil water under irrigation in the dry farmland, soil water and groundwater transforms quite frequently, water quantity exchange is bidirectional and dynamic, the total groundwater recharge is about 33.63 mm during the simulation, infiltration ratio is 5.21%. the amount is relevant to fine aeration zone medium of study area. This research may offer scientific evidence to schedule reasonable irrigation scheme in dry farmland further.

Keywords: Da'an Irrigation District; Hydrus – 1D model; Dry farmland irrigation; Recharge

土壤水是地表水与地下水联系的纽带, 降水和灌溉水转化为土壤水才能被植被吸收^[1]。土壤水分运动过程属于广义渗流理论的研究范畴, 其理论基础为 Darcy 定律, 由于其研究比较复杂, 长时期内处于定性描述和经验方法的阶段^[2-3]。Philip 于 1966 年提出了土壤 – 植物 – 大气连续体 (Soil Plant Atmosphere Continuum, SPAC) 的概念^[4-8], 该理论使土壤水的研究走向多学科交叉阶段。随着计算技术的发展和计算机的普及, 土壤水分入渗研究进入了数值模拟的阶段, 常用的模型有 SWAP、SWAT、WAVE 及 HYDRUS 模型等^[9]。其中, Hydrus – 1D 模型在我国一些灌区、试验田、农田的土壤水分补给、运移、渗漏

收稿日期: 2013-07-05
基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072255); 吉林省自然科学基金项目 (201115035)
作者简介: 卞建民 (1968—), 女, 吉林延吉人, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水资源评价及水环境与水生态研究。E-mail: bianjianmin@126.com。

的研究中应用广泛、并取得了较大成果。马欢等^[10]利用该模型分析了位山灌区的田间水循环规律,王鹏等^[11]依据该模型估算了山西省运城市董村农场农田 SPAC 系统的水分通量,毕经伟、曹巧红、张志悦等^[12-14]分别应用该模型模拟了灌区或试验田的农田土壤水分及氮素动态运移特征,王水献等^[1]运用该模型评价了焉耆盆地典型试验区的土壤水资源量等,为我国农田生态系统土壤水分循环规律的模型模拟研究奠定了坚实基础。

吉林西部大安灌区位于东北西部苏打盐碱土分布区的核心地带,干旱缺水、土质瘠薄,严重制约了当地农业发展。为解决该区水资源短缺问题、保证粮食生产安全,吉林省政府开展了土地整理工作,实施了“大安灌区工程”^[15-17]。通过水利工程措施改良开发盐碱地,降低作物生长土层含盐量,使其满足作物生长条件。然而灌溉时灌水渗漏到达潜水面,抬高地下水位,在强烈蒸发作用下,易诱发底部盐分向土壤表层聚积,导致土壤次生盐渍化。因此,保证灌区农田需水要求的同时,须防治土壤次生盐渍化的加重。本次依据灌区现状,选择旱田(玉米地)为研究对象,利用 Hydrus - 1D 模型,模拟灌溉情景下玉米地土壤水分的入渗过程,通过对土壤水与地下水动态交换关系的分析,阐明深层渗漏可能对灌区的影响。

1 研究区概况及问题

大安灌区位于松嫩平原西部,大安市东半部,为中重度苏打盐渍土的典型代表区^[18],如图 1 所示。属于中温带干旱、半干旱大陆性季风气候区,四季气候分明,生态环境十分脆弱^[19-20]。区内年均降水量 413.7 mm,年均蒸发量 1 688.6 mm,年均气温 4.3℃^[21]。全境地貌平坦开阔,地势起伏较小,地下水埋藏浅,径流缓慢。其中,与土壤水频繁交换的第四系浅层地下水,水位埋深多为 2~5 m,水化学类型主要为重碳酸钙钠型和重碳酸钙镁型,矿化度一般小于 0.5 g·L⁻¹左右,含氟量多在 1.6~2.0 mg·L⁻¹。受农业施肥的影响,近年来部分监测点地下水中硝酸盐的含量呈增加趋势,地下水水质有所变差。

灌区规划面积 8.74 万 hm²,其中旱田灌溉 0.28 万 hm²,约占 3.16%。旱田灌溉区玉米种植比例较高,长期以来,由于高温少雨,蒸发强烈,地下水浅埋区土壤含盐量普遍偏高,土壤次生盐碱化使大面积土地失去生态功能,玉米产量不稳定,干旱年平均单产不足丰收年的三分之一,严重影响了当地农业经

济发展和人民生活水平。以往该区农业主要依靠大气降水和旱季的灌溉井应急补给,很难保证作物的持续高产。

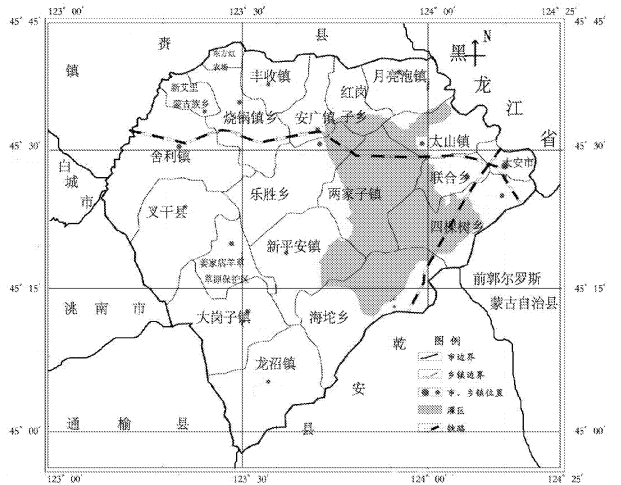


图 1 大安灌区地理位置简图

Fig.1 Da'an irrigation district geographical location diagram

2 数据来源及方法

本次模拟采用 Hydrus - 1D 模型,该模型是由美国国家盐改中心(US Salinity laboratory)于 1991 年开发的,用于模拟变饱和和多孔介质中的水分、热量和溶质运移的数值模型^[22]。能够较好地模拟水分、溶质和能量在土壤中的时空分布变化及运移规律。本次模拟中考虑根系吸水、根系生长、冠层截留。模型应用中所需参数及计算方程如下所述。

2.1 数据来源

本次模拟主要采用的数据包括:土壤特征参数、作物生长参数、模型所需要的气象参数等。

灌区土壤划分为 3 层,第 1 层为粉砂质粘壤土,厚约 150 cm;第 2 层为壤土,厚约 150 cm。第三层为粉砂质粘壤土,厚约 200 cm。根据土壤颗粒粒径分析试验获得容重及砂粒、粉粒、粘粒的百分数,利用模型自带的神经网络预测模块,获得各剖面的土壤特性参数:饱和含水量 Q_s 、残余含水量 Q_r 、经验参数 α 、曲线形状参数 n 、饱和导水率 K_s 、曲率系数 l ,见表 1。

表 1 土壤特性参数取值

Table 1 Value of the parameters of the soil properties

层	Q_r	Q_s	α	n	K_s	l
1	0.0795	0.4347	0.0122	1.5613	3.98	0.5
2	0.0665	0.4339	0.0365	1.2326	5.74	0.5
3	0.0836	0.4464	0.0118	1.5626	8.01	0.5

作物生长参数主要指模拟对象 - 玉米生长参数, 包括植株高度(CH)、叶面积指数(LAI)和根系深度(RD)。通过查阅资料、参考前人对玉米生长参数的研究, 掌握玉米各生育期生长参数的特征规律, 并结合当地玉米生长情况, 参数具体见图 2。

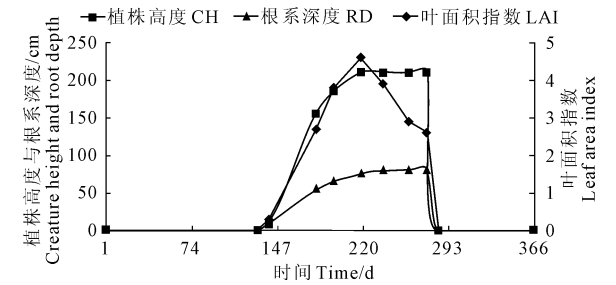


图 2 玉米生长参数
Fig.2 Maize growth parameters

玉米根系吸水参数源于 Hydrus - 1D 模型数据库(表 2)。

表 2 作物吸水参数取值

Table 2 Value of the root - water uptake parameters						
P0	P0 _{opt}	P2H	P2L	P3	r2H	r2L
- 15	- 30	- 325	- 600	- 8000	0.5	0.1

表中 P0、P0_{opt}、P2H、P2L、P3 为压力水头, r2H、r2L 为潜在蒸腾速率, P2H、P2L 分别与 r2H、r2L 对应。Feddes 模型假设压力水头低于 P0 时根系开始吸水; 压力水头在 P0_{opt} 和 P2H(P2L) 之间, 根系吸水达到理想状态; 在 P2L 和 P3 间或 P0_{opt} 和 P0 间时根系吸水线性变化; 小于 P3 或大于 P0 时根系吸水为 0。

利用 Hargreaves 公式计算蒸散量 ET_p, 需要输入每天的最高最低气温值(图 3), 数据来至中国气象科学数据共享服务网大安气象站的数据。

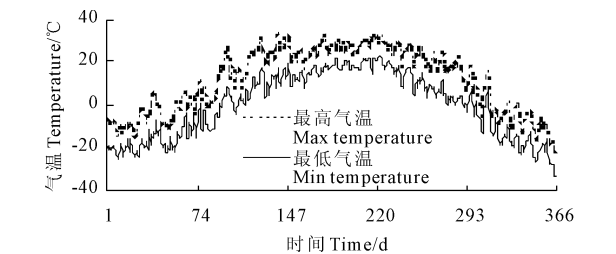


图 3 最高最低气温逐日变化图
Fig.3 Daily variation of Max & Min temperature

2.2 计算方法

模拟中涉及的计算方程和模型主要包括以下几部分:

1) 水分运动基本方程。

包气带多孔介质中土壤水一维垂向运动可用改进的 Richards 方程表示, 其数学模型为:

∂θ/∂t = ∂/∂x [K (∂h/∂x + cosα)] - S (1)

式中, θ 为土壤体积含水率(%); K 为土壤水导水率(cm · d⁻¹); h 为压力水头值(cm); α 为水流方向与垂向的夹角; S 为根系吸水率(cm³ · d⁻¹)。

2) 土壤水分特征方程。

模型使用 van Genuchten 1980 提出的土壤水分特征方程, 方程如下:

θ(h) = { θ_r + (θ_s - θ_r) / [1 + |αh|ⁿ]^m , h < 0
θ_s , h > 0 (2)

K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]² (3)

其中: m = 1 - 1/n, n > 1
式中, θ(h) 为土壤体积含水率; θ_r 为残余土壤含水率; θ_s 为饱和土壤含水率; α, m, n 为经验参数; h 为土壤基质势; K_s 为饱和渗透系数; S_e 为有效含水率; l 为孔隙连通性参数。

3) 根系吸水及生长模型。

作物根系吸水采用 Feddes 模型^[23]:

S(h) = ∂(h) S_p (4)

式中, ∂(h) 为水分胁迫响应方程; S_p 为潜在吸水率(d⁻¹)。

根系生长模型: 对于年度生长植被, 模型需要模拟根系深度随时间的变化, Hydrus 模型假定真实的根系深度是最大根系深度 L_m 和根系生长系数 f_r(t) 的乘积, 即:

L_R(t) = L_m f_r(t) (5)

4) 潜在蒸发量计算公式。

在 Hydrus - 1D 模拟模型中, 可以 Hargreaves 公式和 Penman - Monteith 公式计算潜在蒸散量 ET_p。相对而言, Hargreaves 公式更简单, 需要的参数也少, 表示如下:

ET_p = 0.00023 R_a (T_m + 17.8) √TR (6)

式中, R_a 为地外辐射(mm · d⁻¹); T_m 为每天平均气温(°C); TR 为每日气温变化幅度(°C)。

3 模型应用及结果讨论

3.1 模型应用

根据灌区地层岩性信息将模拟土层划分为 3 层。模拟时段从 2009 年 1 月 1 日至 12 月 31 日, 共 365 天。其中玉米生育期为 5 月 10 日至 10 月 10 日, 共 153 天。

上边界定为大气边界 – 可积水,模拟中接受降水、灌溉补给,通过蒸发、作物蒸腾排泄。模拟期

2009 年为一个平水年,降水量如图 4 所示。

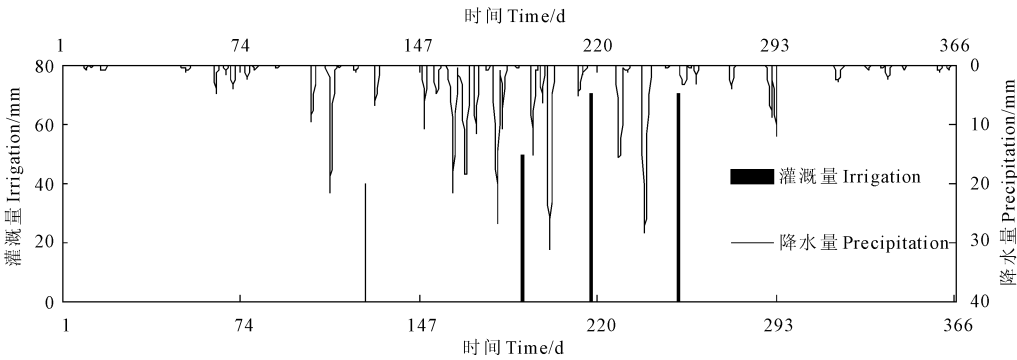


图 4 降水与灌溉变化图

Fig.4 Variation of precipitation and irrigation

根据降水情况,结合玉米的需水规律,模拟中在玉米播种前(5月5日)、拔节期(7月6日)、抽穗开花期(8月5)、乳熟期(9月10日)灌水4次,灌水定额分别为40mm、50mm、70mm、70mm,见图4。模拟期间包气带厚度随时间不断变化,因此下边界取为变水头边界。初始条件以压力水头表示。

3.2 结果讨论

3.2.1 蒸散发动态规律 旱田灌溉条件下,玉米地蒸发、蒸腾逐日变化如图5所示。模拟期间玉米根系吸水主要消耗于叶片蒸腾作用,蒸发、蒸腾动态变化幅度较大。模拟中实际蒸腾量为435.17mm,实际蒸发量为199.36mm,蒸腾约占蒸散发消耗的68.58%;潜在蒸腾量为456.73mm,实际蒸腾量占潜在蒸腾量的95.28%,表明该研究中玉米蒸腾受水分胁迫影响较小。

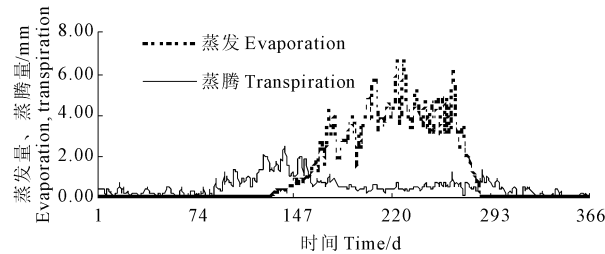


图 5 蒸发与蒸腾逐日变化过程

Fig.5 Daily variation of evaporation and transpiration

模拟初期(1月—4月)和模拟末期(11月—12月末),由于灌区气温较低,积雪覆盖,无植被生长,蒸腾量为零,蒸发量较小。玉米生育期(5月—10月),气温相对较高,旱田有作物生长,蒸腾量急剧上升。苗期阶段,玉米长势较弱,植株低矮、叶面窄小、根须短浅且稀疏,玉米生理需水量、根系吸水量相对较小,故较拔节期、抽穗开花期、乳熟期,玉米蒸腾量

也小;蜡熟完熟期,植株果穗籽粒干重逐渐接近最大值,生理需水量随之减少,与此同时,玉米叶片开始逐渐变黄,叶面积指数减小,导致叶面蒸腾量也减少,尤其是完熟期。在玉米生长旺季,由于叶片遮蔽了大量地表,土壤蒸发量小于玉米生长的前期和末期。根据模拟分析可知,玉米生育期内累积蒸发量为110.58mm,蒸腾量约为蒸发量的3.84倍,土壤水分蒸散发消耗的79.74%由玉米蒸腾作用所致。

蒸发和蒸腾的逐日变化过程表明,田间蒸散发在作物生长旺季以蒸腾为主,其它时段则以蒸发为主;季节性种植作物的农田,气象条件、叶面积指数(LAI)是影响田间蒸散发年内变化的主要因素。

3.2.2 入渗补给分析 地下水入渗补给过程即底部交换量动态变化过程,反映了包气带与饱水带的水量交换。模型底部交换量向上为正,即负补给,表示通过毛细作用,饱和带的水反而补给包气带,消耗于蒸散发;向下为负,即正补给,表示包气带土壤在降水和灌溉下达到饱和,下渗补给饱和带,发生深层渗漏,如图6所示。

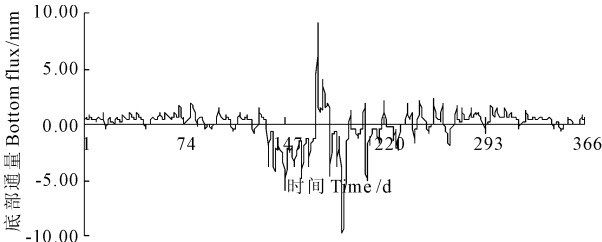


图 6 底部通量变化过程

Fig.6 Variation of bottom flux

由图可知,在模拟期间,土壤水与地下水水量交换比较活跃。地下水累积入渗补给量约为33.63mm,平均补给强度为0.0921mm·d⁻¹。玉米生育期

(153 天),降水量相对较大,加之外来水的灌溉,主要表现为正补给,平均补给强度为 $0.7939 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;非玉米生育期(212 天)降水少,主要表现为负补给,平均补给强度为 $-0.4143 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

灌区内地下水浅埋区,灌溉洗盐条件下,土壤水与地下水水量转化比较频繁,水量交换是双向的、动态的。由于土壤水库调蓄能力有限,容易造成部分灌溉水渗漏补给地下水。通过 Hydrus - 1D 模拟,旱田(玉米地)灌溉条件下地下水累积入渗补给量约为 33.63 mm ,渗漏量占降水和灌溉总量的 5.21% ,该渗漏补给量不大,其与研究区包气带介质岩性相对细密有关。在灌区适当地开采地下水进行灌溉,不仅能削弱灌溉渗漏对地下水位的抬升,还可降低灌区运行成本。灌溉的同时,施用有机肥,可有效改良盐渍性土壤的不良理化性状;除水利改良,进行化学改良,加入石膏,改善土壤结构,加速洗盐排碱,对减小灌区水位抬升有一定意义。

4 结 论

1) 在作物生长旺季,旱田蒸散发以蒸腾为主,其它时段则以蒸发为主。整个模拟期间,蒸腾量约为蒸发量的 2.18 倍;其中玉米生育期内,土壤水分蒸散发消耗的 79.74% 由玉米蒸腾作用所致。苗期阶段玉米长势较弱,生理需水量、根系吸水量小,蒸腾耗水量也小,同蜡熟完熟期一样,玉米蒸腾量较其它生理期要小很多。

2) Hydrus - 1D 模型边界条件设置比较灵活,提供了大量的参数数据库作为参考,可有效地研究田间水循环规律,模型模拟具有成本低、耗时少、结果系列详尽等优点。该次建立了动态根系吸水模型,使土壤水与地下水的动态交换过程更趋于实际,在较长时段的模拟中减小了误差,提高了模型精度,适用于灌区单季种植作物的特点。整个模拟期间,旱田灌溉条件下累积入渗补给饱和带的水量约为 33.63 mm ,渗漏比为 5.21% ,该渗漏补给量与研究区降水灌溉量、蒸散发作用、地下水位、包气带介质岩性等因素密切相关。

3) 对灌区进行灌溉洗盐,能有效地改良开发利用盐碱地。然而深层渗漏的存在,降低了灌溉水的利用效率,抬升了灌区地下水位,易诱发土壤次生盐渍化。应采取相关措施减小灌溉渗漏对灌区的威胁,阻断盐分上升途径,抑制盐分上升速度,从而保证灌区健康运行。

参 考 文 献:

[1] 王水献,周金龙,余 芳,等.应用 HYDRUS - 1D 模型评价土壤

水资源量[J].水土保持研究,2005,12(2):36-38.

- [2] 赵希宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [3] 陈丽娟.疏勒河灌区洗盐条件下土壤水盐运移模拟研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [4] Philip J R. Plant water relations: Some physical aspects[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1966, (17):245-268.
- [5] 李法云,郑 良,宋丽.辽西半干旱区水肥耦合作用对土壤水分动态变化的影响[J].辽宁大学学报(自然科学版),2003,30(1):7-12.
- [6] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.
- [7] 刘群昌,谢森传.华北地区夏玉米田间水分转化规律研究[J].水利学报,1998,(1):62-69.
- [8] 刘昌明.土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J].地理学报,1997,52(4):366-373.
- [9] 汤 英,徐利岗,张红玲,等.HYDRUS - 1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J].安徽农业科学,2011,39(36):22390-22393.
- [10] 马 欢,杨大文,雷慧闽,等.Hydrus - 1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J].农业工程学报,2011,27(3):6-12.
- [11] 王 鹏,宋献方,袁瑞强,等.基于 Hydrus - 1d 模型的农田 SPAC 系统水分通量估算—以山西省运城市董村农场为例[J].地理研究,2011,30(4):622-634.
- [12] 毕经纬,张佳宝,陈效民,等.应用 HYDRUS - 1D 模型模拟农田土壤水渗漏及硝态氮淋失特征[J].农村生态环境,2004,20(2):28-32.
- [13] 曹巧红,龚元石.应用 Hydrus - 1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2):139-145.
- [14] 张志悦,陈皓锐.基于 Hydrus - 1D 模型的冬小麦根系层水分渗漏分析[J].灌溉排水学报,2011,30(3):94-99.
- [15] 刘彩虹,张 琳,卞建民.大安灌区盐碱土土壤水分扩散特征研究[J].节水灌溉,2012,(10):34-37,40.
- [16] 杨 福,梁正伟.关于吉林省西部盐碱地水稻发展的战略思考[J].北方水稻,2007,(6):7-12.
- [17] 张 琳,刘彩虹,卞建民.大安灌区地下水动态特征及灌区实施后的生态环境相应[J].节水灌溉,2012,(4):43-45,50.
- [18] 李潇瀚,王 瑞,卞建民.冻融条件下苏打盐渍土的水盐变化规律研究[J].人民长江,2012,43(9):55-58.
- [19] 卞建民,汤 洁,林年丰.松嫩平原西南部土地碱质荒漠化预警研究[J].环境科学研究,2001,14(6):47-49,53.
- [20] 杨占梅.大安灌区土壤水盐运移的试验及模拟研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [21] 张丽姝.引水灌溉对大安市地下水及表生生态景观的影响研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [22] Simunek J, VanGenuchten MT, Sejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal, 2008,7(2):587-600.
- [23] Feddes R A, Bresler E, Neuman S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems[J]. Water Resources, 1976,10(6):1199-1206.