

不同覆膜开孔率下土壤水分和潜水蒸发的模拟研究

文利军, 史文娟, 高志永, 郭建忠, 何子建, 石肖肖

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为研究蒸发阶段不同覆膜开孔条件下土壤水分运动, 在室内进行蒸发模拟试验的基础上, 采用 HYDRUS-1D 模型对不同覆膜开孔率和大气蒸发能力条件下土壤剖面含水率和潜水蒸发量动态变化进行了模拟, 并与实测资料进行比较。结果表明: 土壤剖面含水率同时受大气蒸发能力和覆膜开孔率的共同作用, 随覆膜开孔率和大气蒸发能力的增加, 土壤剖面含水率减小, 且上层土壤含水率差异比下层土壤明显; 覆膜开孔率和大气蒸发能力一定时, 土壤剖面含水率在蒸发初期有所增加, 蒸发后期基本保持稳定; 覆膜对潜水蒸发的阻滞作用明显, 但开孔率增加到一定数值时, 表层盐分的影响大于覆膜的影响, 使土壤含水率增大, 累积蒸发量减小。经实测数据验证, 模型精度较好, 表明 HYDRUS-1D 模型用于不同覆膜开孔率下的土壤水分运动模拟是可行的。

关键词: HYDRUS-1D 模型; 覆膜开孔率; 潜水蒸发; 土壤水分

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)01-0225-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.032

Simulated Study on Soil Moisture and Phreatic Evaporation Under Different Aperture Ratios of Film Mulching

WEN Lijun, SHI Wenjuan, GAO Zhiyong, GUO Jianzhong, HE Zijian, SHI Xiaoxiao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The purpose of this study was to investigate dynamic variations of soil water under the phreatic evaporation with different aperture ratios of plastic mulch. Based on column simulation laboratory indoors, HYDRUS-1D model was used to simulate variations of soil water content under different aperture ratios of plastic mulch and atmospheric evaporation capacity, and then the result was compared with the measured data. The results indicated that soil water content was affected by both aperture ratio of plastic mulch and atmospheric evaporation capacity. The soil water content decreased with the increase of the aperture ratios of plastic mulch and atmospheric evaporation capacity with the same depth of soil profile. The fluctuations of soil water content in the upper layer was more obvious than that in the lower layer. When the aperture ratio of plastic mulch and atmospheric evaporation capacity was fixed, the soil water content increased in the early evaporation period and remained stable in the later evaporation period. The evaporation was obviously inhibited by plastic mulch, but when the opening rate of mulching increases to a certain value, the effect of surface salinity on soil evaporation is greater than that of mulching. Mulching increases soil moisture content and decreases cumulative evaporation. The simulation precision of model which was checked by the measured data was well. So it is feasible with HYDRUS-1D model to simulate soil water movement under different aperture ratios of plastic mulch.

Keywords: HYDRUS-1D model; aperture ratio of plastic mulch; phreatic evaporation; soil moisture

土壤的盐碱化问题是制约干旱地区农业发展的主要障碍,也是影响绿洲农业生态系统稳定的重要因素。我国的盐渍土面积分布较广,仅西北地区的盐碱地面积就约占全国盐碱地面积的 1/3 以上,而新疆地区的

盐碱土则占到全国盐碱土的 22.01%^[1]。与此同时,因灌溉和管理不善等原因,灌区地下水埋深较浅,潜水蒸发强烈,引起盐分上升并在地表积累,使土壤的次生盐渍化仍有加剧的趋势。有研究^[2-3]表明,地膜覆盖有增温、

收稿日期:2019-07-23

资助项目:国家自然科学基金项目(51379173);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5051);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS085)

第一作者:文利军(1993-),男,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:2959358411@qq.com

通信作者:史文娟(1972-),女,陕西武功人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:shiwj@xaut.edu.cn

保墒、节水、抑盐的作用。在相同大气蒸发能力和土壤条件下,覆膜开孔率直接影响水分的蒸发和土壤含水量的分布,进而影响土壤盐分的分布。因此,研究不同覆膜开孔条件下的土壤水分动态变化对于盐碱地的改良和次生盐碱化的发生具有十分重要的意义。

对于覆膜开孔条件下土壤水分运移的研究前人^[4-6]已经做了大量工作,但主要还是集中于入渗方面;李毅等^[7]对不考虑地下水条件下不同覆膜开孔率土壤的水盐运移规律进行了研究,但对潜水蒸发条件下不同覆膜开孔率的水分运动以及模拟研究相对较少。影响潜水蒸发的主要因素可归纳为 2 个方面,一方面是外界蒸发能力,另一方面是土壤输水能力,二者相互影响,缺一不可,潜水蒸发的大小受控于二者中的较小者。日照、地温、相对湿度、气温、降雨等气象因素,都属于外界蒸发力;而土壤质地、潜水埋深、作物覆盖等因素,都属于土壤输水能力,2 种影响因素相互作用,共同决定着潜水蒸发^[8-10]。Gong 等^[11]分析得出,影响参考蒸散发的最主要因素是相对湿度,其他影响因素与相对湿度相比,影响较小;Yang 等^[12]、Unold 等^[13]通过大量试验研究表明,潜水蒸发主要受制于土壤的输水能力和大气蒸发能力,而土壤的输水能力与土质、潜水埋深等因素有关。

HYDRUS 模型是模拟非饱和流和溶质运移应用最广的模型之一,因为其在土壤水分运动、热量交换、溶质运移与作物根系吸收等方面,具有灵活的边界条件,得到了广泛应用^[14-18]。姚荣江等^[19]利用 HYDRUS-1D 模型较好的模拟了盐分在农田土壤中的分布和时间变化趋势;王鹏等^[20]研究表明,HYDRUS-1D 模型模拟农作物土壤水分的效果较好,但在灌溉后以及长期干旱条件下模拟效果较差;魏茅^[21]用 HYDRUS-1D 水氮联合模型模拟玉米农田水分氮素运移转化过程,经验证模型模拟精度较高;刘建军等^[22]认为,HYDRUS-1D 模型在反推土壤水力特性参数及模拟土壤水分运动方面是可行的;Phillips^[23]采用 HYDRUS-2D 模型预测的水分和溶质运移的结果和实测值非常接近;Ma 等^[24]用 HYDRUS-1D 模型预测的入渗率和实测值拟合精度较高。以上研究表明,HYDRUS 模型是模拟土壤水分和溶质运移的有效工具之一。本文利用 HYDRUS-1D 模型对潜水埋深较浅情况下不同覆膜开孔率和大气蒸发能力条件下对新疆砂壤土的水分动态规律进行模拟,并采用室内土柱蒸发资料进行验证,以期为进一步研究覆膜条件下的水盐运动提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤取自新疆巴州水利管理处水利部重点灌溉试验站(41°36′N,86°12′E),土壤容重用环刀

法测得为 1.75 g/cm³,将取回的土样在阴凉处干燥、风干,过 2 mm 筛后备用。土壤粒径组成利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,马尔文仪器有限公司,英国)进行测定。根据国际制土壤质地分类标准:黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为 1.82%,9.61%,88.57%;土壤初始含盐量为 7.29 g/kg^[25],属于中度盐化的砂壤土。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 7 月 1 日在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室开展。试验设定了 3 种大气蒸发能力和 4 种不同覆膜开孔率,共 6 种处理方式,具体见表 1;每个处理重复 3 次,共计 18 组处理。试验装置系统由土柱、供水装置、红外灯 3 部分组成。土柱采用 0.5 cm 厚的有机玻璃材料制成,内径为 20 cm,高为 60 cm;土柱两边各开一排(共 2 排)直径为 2 cm 的取样孔,上下孔心之间的间隔为 5 cm,土柱底部设有石英砂反滤层。试验所用蒸发水源为蒸馏水,采用马氏瓶进行自动供水并控制地下水位(50 cm),蓄水层厚度为 10 cm。在各处理土柱毛管水上升达到稳定时,采用不同功率的红外灯日夜照射用于模拟不同大气蒸发能力下的潜水蒸发,同时采用与土柱横截面积相同的蒸发皿同时照射来率定大气蒸发能力,整个试验历时 10 天。在试验开始、试验 5,10 天结束时分层取样,采用称重烘干法测定土壤的含水率,实测值作为模拟值的验证资料。

表 1 模拟方案设计和基本数据

土壤 编号	大气蒸发能力 $E_0/(mm \cdot d^{-1})$	开孔率/ %	地下 水埋深/cm
1	20.66	9.97	50
2	23.85	9.97	50
3	31.69	9.97	50
4	31.69	3.24	50
5	31.69	20.27	50
6	31.69	100.00	50

1.3 模型原理

1.3.1 模型的基本方程 水分运动基本方程:

$$\frac{\partial \theta(h,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |ah|^n) - m \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s \theta_e' [1 - (1 - \theta_e')^m]^2 \quad (3)$$

式中: θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); h 为负压水头(cm); K 为水力传导系数(cm/d); t 为时间(min); z 为空间坐标,原点在地面,向下为正; S 为根系吸水项。 θ_e 为有效土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为残余土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和土壤含水率(cm^3/cm^3); a 、 n 、 m 为经验拟合参数(曲线性状参数),其中

$m=1-1/n$; K_s 为饱和土壤导水率 (cm/d)。

1.3.2 初始和边界条件 尽管不同覆膜开孔率条件下的土壤表层的水分运动为三维的水分运动过程,但由于潜水补给在垂直方向上的尺度远大于水平方向的尺度,因此,可忽略土壤表层水分的水平运动,根据实测资料的分析,虽然大气蒸发能力一定,但由于土柱上方覆膜,每日的潜水蒸发强度变化幅度不是很大,但也存在一定差异,故为不稳定蒸发。模拟的上边界条件选择大气产流边界条件,下边界条件选择恒定含水量,初始条件选择含水量。根据实测数据资料计算得出不同覆膜开孔率和大气蒸发能力条件下的每日潜水蒸发强度,将其作为边界条件的输入值。

1.3.3 时间参数取值 为保持和实测资料一致,本次模拟历时亦取为 10 天。

1.3.4 土壤参数取值 土壤水力特性模型选择 Van-Genuchten 模型,具体表达形式为:

$$\theta(h)=\begin{cases} \theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha h|^n]^m} & h<0 \\ \theta_s & h\geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

模型所需的试验土壤特性参数 K_s 、 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 参数是基于最小二乘法原理通过 Matlab 软件包拟合得出,分别为 3.124 8 cm/d、0.014 5 cm³/cm³、0.463 3 cm³/cm³、0.012 4、1.518 1。

2 结果与分析

2.1 不同大气蒸发能力条件下土壤含水量模拟结果分析

根据控制条件的不同,蒸发阶段的土壤含水量分布必然随之改变。由图 1 可知,当覆膜开孔率为 9.97% 时,不同大气蒸发能力条件下,蒸发阶段 5、10 天的土壤剖面含水量分布存在不同,在潜水蒸发过程中,土壤剖面含水量随土柱剖面深度的增加呈现不断增加趋势,直到深度为 50 cm 左右时接近饱和土壤含水量。蒸

发 10 天结束时,同一大气蒸发能力条件下,各个剖面深度的土壤剖面含水率比蒸发 5 天结束时明显增大,说明覆膜情况下,蒸发历时的增加使土壤表层盐分积聚更多,从而抑制水分蒸发,使土壤含水率增大。另外,图 1 中均有一个明显的变化:土壤含水率的变化随大气蒸发能力的改变不规律,不呈线性变化。贾茂茂^[26]研究表明,在相同地下水埋深和裸土条件下,潜水蒸发强度随大气蒸发能力的增加而增加。由此推断在裸土蒸发过程中,不同处理土壤剖面含水率随大气蒸发能力的增加而减小。而图 1 中,土壤含水率随大气蒸发能力的增加呈现先增大后减小的趋势, $E_0=23.85$ mm/d 的土壤含水率最大,而 $E_0=20.66$ mm/d 的土壤含水率比 $E_0=31.69$ mm/d 的稍大,但幅度很小。

2.2 不同覆膜开孔率条件下土壤含水量模拟结果分析

当大气蒸发能力为 31.69 mm/d 时,不同覆膜开孔率条件下,蒸发历时 5、10 天的土壤剖面含水率分布的模拟结果见图 2。从图 2 可以看出,与图 1 相同,蒸发 10 天结束时,同一覆膜开孔率条件下,各个深度的土壤剖面含水率比蒸发 5 天结束时明显增大,抑制潜水蒸发效果较明显。在深度为 5—20 cm 土层含水率减小的幅度较为明显,但在深度 20—50 cm 土层中,土壤含水率减小幅度很小,3 条曲线尾端接近重合,即上层土壤含水量的减小幅度大于下层土壤含水量的减小幅度,这与地下水埋深较浅、土面蒸发近似于稳定蒸发有关。此外,蒸发 10 天后,覆膜开孔率的增加使土壤剖面含水率有所减少;但蒸发 5 天结束时,开孔率 20.27% 的土壤含水率却大于同时间内开孔率 3.24% 和 9.97% 的土壤含水率。通常认为,随覆膜开孔率的增加,土壤含水率呈减小趋势。模拟结果说明土壤含水率的分布不只与覆膜开孔率有关,还受土壤盐分等多因素的影响。

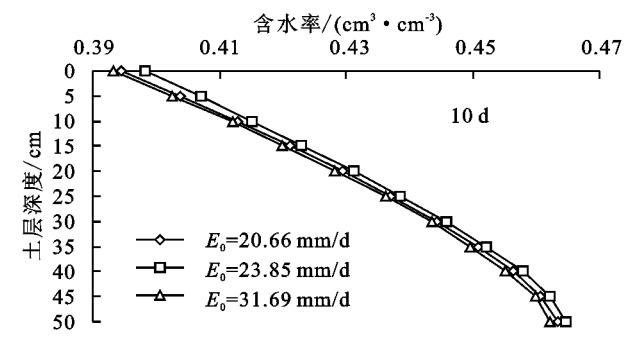
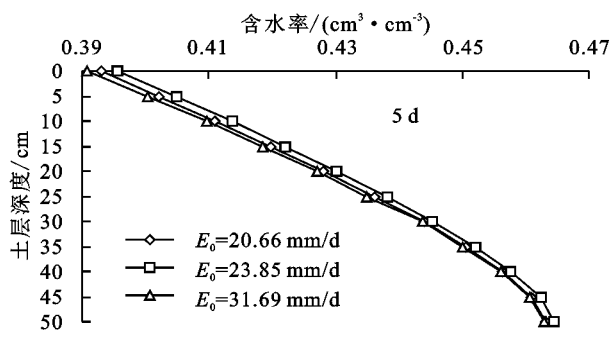


图 1 不同大蒸发能力条件下的土壤含水量变化

2.3 土壤累积蒸发量模拟结果分析

为了解不同覆膜开孔率对潜水蒸发的影响,对同一大气蒸发能力下不同覆膜开孔率的潜水累积蒸发量进行模拟,当大气蒸发能力为 31.69 mm/d 时,模拟结果见图 3。由图 3 可知,开孔率 100% 时即裸土情况下的土壤

累积蒸发量最大,与裸土相比,开孔率分别为 3.24%、9.97%、20.27% 时,蒸发结束时其抑制潜水蒸发量的百分比分别为 82.20%、77.12%、81.93%。一般情况下,随蒸发历时的增加,土壤累积蒸发量随开孔率的增加而增加,但是,图 3 中开孔率 20.27% 的土壤累积蒸发量却比

相同情况下开孔率为 9.97% 的土壤累积蒸发量要小,产生这种异常现象的原因在于,开孔率为 20.27% 的土壤在蒸发初期,土壤表面积分的盐分较多,形成的盐壳较厚,盐壳反过来又阻止了潜水蒸发,此结果与 2.2 章节中土壤含水率的变化相一致。由此可见,开孔率越小,覆膜

对潜水蒸发的抑制作用越显著,但对于含盐量较高的土壤来说,当开孔率增大到一定程度时,土表积累的盐分则会抑制潜水的进一步蒸发,使得开孔率较大时其累积蒸发量反而减小。因此,可以根据实际的土壤和作物情况确定其适宜的开孔率。

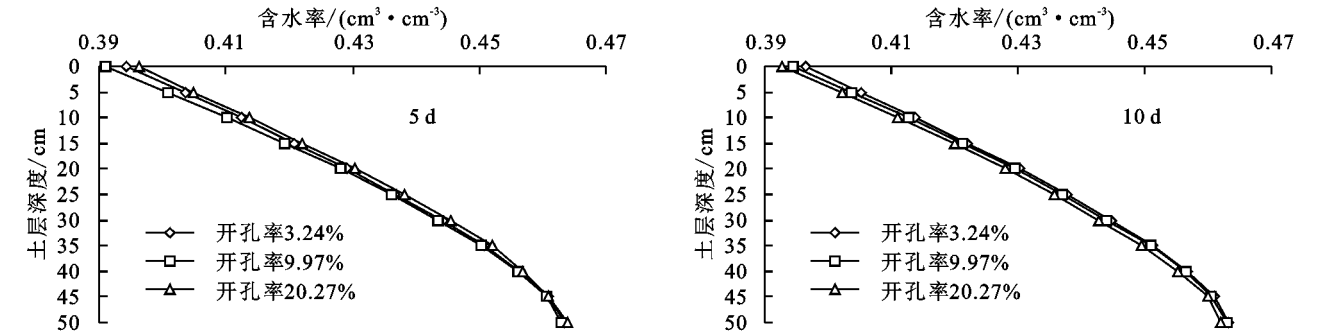


图 2 不同覆膜开孔率条件下土壤含水率变化

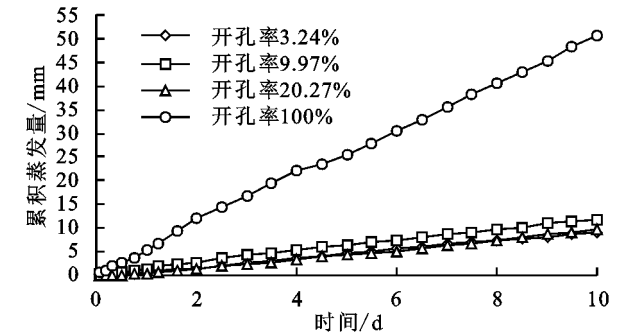


图 3 不同覆膜开孔率下土壤累积蒸发量随时间的变化

2.4 模拟结果的验证与对比

2.4.1 土壤含水率误差分析 为了进一步分析模拟的精度,对 1 号、2 号、3 号土不同土柱剖面深度下土

壤含水率的模拟值与实测值进行了误差分析。由表 2 可知,覆膜开孔条件下土壤含水率变化的模拟值与实测值在试验开始、5 天、10 天后的平均相对误差控制在 0.7%~3.5%,0.8%~7.0%,0.3%~5.1%。2 号土在蒸发 5 天后和 10 天后的平均相对误差较大,1 号土和 3 号土都比较小。总体来说,1 号土和 2 号土埋深由上至下的平均相对误差越来越小,表层土壤的平均相对误差比底层要大,而 3 号土正好相反。考虑到模拟过程中忽略了表层土壤水分的水平流动,但平均相对误差仍在允许范围内。因此可以说 HYDRUS-1D 能较好的模拟覆膜条件下土壤含水率的变化,模拟在总体上比较成功。

表 2 土壤含水率模拟值与实测值平均相对误差 单位:%

埋深/cm	1 号土			2 号土			3 号土		
	开始	5 d 后	10 d 后	开始	5 d 后	10 d 后	开始	5 d 后	10 d 后
5~15	0.13	1.39	2.32	5.88	9.27	8.26	-1.23	0.03	-0.34
15~25	2.42	2.13	0.46	2.60	7.50	4.50	0.97	-0.73	-1.36
25~35	1.03	0.62	0.81	3.43	6.28	4.91	0.61	2.05	0.62
35~45	0.57	0.73	0.78	1.48	3.64	2.80	2.41	2.01	2.27

2.4.2 土壤累积蒸发量对比 为了验证模型的模拟效果和准确性,对 3 号、4 号土的土壤累积蒸发量模

拟结果与实测资料作对比。由图 4 中可知,模拟出的累积蒸发量与实测值接近相同,吻合较好。

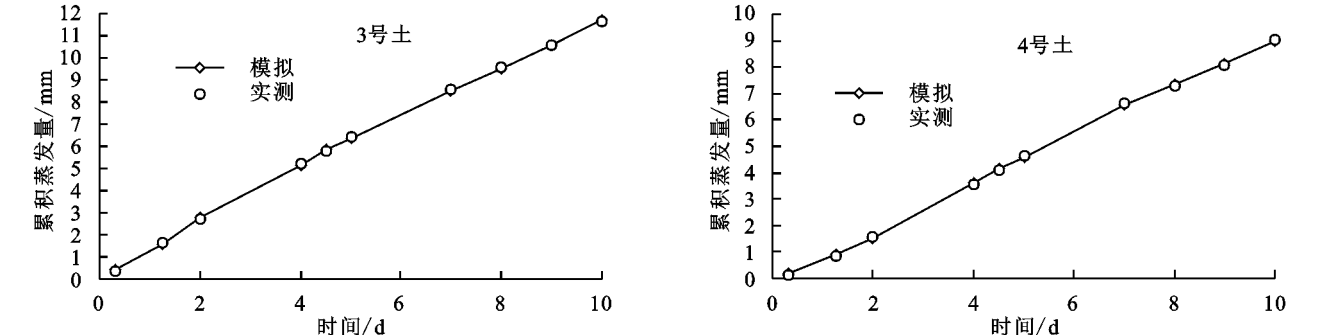


图 4 累积蒸发量模拟值与实测值对比

3 结论

(1)土壤剖面含水率分布受覆膜开孔率和大气蒸

发能力大小共同影响,土壤剖面含水率随大气蒸发能力和覆膜开孔率的增大而减小,且表层土壤含水率之

间的差异大于下层土壤。

(2)覆膜开孔率和大气蒸发能力一定条件下,随着蒸发历时的增加,土壤剖面含水率增加,但在试验前期开孔率为 20.27%较 9.97%和 3.24%显著,试验后期几乎不变,这与毛管水上升阶段向蒸发阶段的转变有关。

(3)土壤累积蒸发量随开孔率增大而增大,其开孔率分别为 3.24%,9.97%,20.27%时,其蒸发结束时,累积蒸发量分别为裸土蒸发量的 17.80%,22.88%,19.07%。覆膜对潜水蒸发的阻碍作用明显,但对于含盐量较高的土壤来说,当开孔率增大到一定程度时,土表积累的盐分则会抑制潜水的进一步蒸发,使得开孔率较大时其累积蒸发量反而减小。

(4)总体上,模拟值与实测值的平均相对误差在合理范围之内,说明 HYDRUS-1D 软件用于模拟不同覆膜开孔条件下土壤水分动态预测是可行的。

参考文献:

- [1] 胡明芳,田长彦,赵振勇,等.新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J].西北农林科技大学学报,2012,40(10):111-117.
- [2] 封晓辉,张秀梅,郭凯,等.覆盖措施对咸水结冰灌溉后土壤水盐动态和棉花生产的影响[J].棉花学报,2015,27(2):135-142.
- [3] Tan S, Wang Q J, Xu D, et al. Evaluating effects of four controlling methods in bare strips on soil temperature, water, and salt accumulation under film-mulched drip irrigation [J]. Field Crops Research, 2017, 214: 350-358.
- [4] 李毅,任鑫.覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验[J].农业机械学报,2012,43(11):58-64.
- [5] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.
- [6] 高金芳,李毅,陈世平,等.覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响[J].农业机械学报,2010,41(9):50-55.
- [7] 李毅,王全九,王文焰,等.覆膜开孔土壤蒸发实验研究[J].应用生态学报,2005,16(3):445-449.
- [8] 王思如,雷慧闽,段利民,等.气候变化对科尔沁沙地蒸散发和植被的影响[J].水利学报,2017,48(5):535-544,555.
- [9] 贾瑞亮,周金龙,高业新,等.干旱区高盐度潜水蒸发规律初步分析[J].水科学进展,2015,26(1):44-50.
- [10] 陆小明,杨秒,王振龙,等.淮北平原气象因素对裸地潜水蒸发的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(4):84-91.
- [11] Gong L B, Xu C Y, Chen D L, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. Journal of Hydrology, 2012, 329(3/4): 620-629.
- [12] Yang M K, Yanful E. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions [J]. Advances in Environmental Research, 2002, 6(4): 505-521.
- [13] Unold G V, Fank J. Modular design of field lysimeters for specific application needs [J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2008, 8(2): 233-242.
- [14] 王文,刘永伟,寇小华,等.基于集合卡尔曼滤波和 HYDRUS-1D 模型的土壤剖面含水量同化试验[J].水利学报,2012,43(11):1302-1311.
- [15] 丁建丽,陈文倩,王璐. HYDRUS 模型与遥感集合卡尔曼滤波同化提高土壤水分监测精度[J].农业工程学报,2017,33(14):166-172.
- [16] 陈帅,毛晓敏.滴灌土壤湿润体迁移计算的人工神经网络模型[J].排灌机械工程学报,2020,38(2):206-211.
- [17] Simunek J, van Genuchten M T, Sejna M. Hydrus: Model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1261-1274.
- [18] 李冰冰,王云强,李志. HYDRUS-1D 模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.
- [19] 姚荣江,杨劲松,郑复乐,等.基于表观电导率和 Hydrus 模型同化的土壤盐分估算[J].农业工程学报,2019,35(13):91-101.
- [20] 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.
- [21] 魏茅.灌区农田水氮运移机理及其数值模拟研究[D].西安:长安大学,2014.
- [22] 刘建军,王全九,王卫华,等.利用 Hydrus-1D 反推土壤水力参数方法分析[J].世界科技研究与发展,2010,32(2):173-175.
- [23] Phillips I R. Modelling water and chemical transport in large undisturbed soil cores using HYDRUS-2D [J]. Soil Research, 2006, 44(1): 27-34.
- [24] Ma Y, Feng S Y, Su D Y, et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71: 540-547.
- [25] 文利军,史文娟,庞琳娜. γ -聚谷氨酸对土壤水分入渗和水盐运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):76-80,87.
- [26] 贾云茂.裸地条件下农田潜水蒸发规律及其计算[J].山西科技,2008(6):116-118.