

# 覆膜开孔条件下盐渍土壤的潜水蒸发 及水盐运移特性

史文娟<sup>1</sup>, 邢旭光<sup>1</sup>, 张振华<sup>1,2</sup>, 王粉萍<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 山东省德州市水利局基本建设室, 山东 德州 253014; 3. 周至县农广校, 陕西 周至 710400)

**摘要:** 为研究地下水浅埋区不同覆膜开孔率盐碱土的潜水蒸发和水盐运动情况, 在室内进行了土柱蒸发模拟试验(地下水埋深 50 cm)。结果表明, 与不覆膜相比, 覆膜可显著降低潜水蒸发强度、减少潜水累积蒸发量, 同时也有效减少了盐分在土表的积累量。蒸发结束时, 开孔率分别为 3.24%、9.97% 和 20.27% 的潜水累积蒸发量与裸土相比分别减少了 79.87%、74.19% 和 77.93%, 土层深度 5 cm 范围内土壤电导率分别降低了 36.93%、34.41% 和 35.16%, 即覆膜开孔率的差异对盐分累积的影响小于对潜水蒸发的影响。三种处理中, 9.97% 开孔率的土表积盐量和潜水蒸发量均相对较大。随着蒸发历时的增加, 不同处理土壤含水量剖面的变化相对较小, 但潜水蒸发强度却有所降低, 这与蒸发过程中盐壳形成后反过来又抑制了潜水蒸发有关。其次, 覆膜阻滞不同盐离子表聚的效果不同, 其中  $\text{Cl}^-$  表聚作用受开孔率影响较大, 而  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  表聚作用受开孔率影响不大。

**关键词:** 覆膜开孔率; 潜水蒸发; 土壤水盐运移

中图分类号: S152.7+3 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0026-05

## Characteristics of groundwater evaporation and water-salt transport in saline soil under different opening ratios of film

SHI Wen-juan<sup>1</sup>, XING Xu-guang<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1,2</sup>, WANG Fen-ping<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Northwest Water Resources and Ecological Environment of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Department of Fundamental Construction of Dezhou Municipal Water Resources Bureau, Dezhou, Shandong 253014, China; 3. Zhouzhi Agricultural Broadcast School, Zhouzhi, Shaanxi 710400, China)

**Abstract:** The indoor simulating experiment of evaporation was carried out in soil columns to observe the behaviors of groundwater evaporation and water-salt movement in saline soil in shallow water-table zone under different opening ratios of film. The results showed that film mulching could significantly inhibit the groundwater evaporation and reduce the salt accumulation on the soil surface compared with no plastic mulching. Under the condition of 3.24%, 9.97% and 20.27% opening ratios, the accumulated groundwater evaporation was reduced by 79.87%, 74.17% and 77.93% respectively, and the conductivity of soil solution was reduced by 33.18%, 22.70%, and 25.57% respectively, in contrast with the control at the end of the ten days. Therefore, the influence of mulching to groundwater evaporation was more obvious than to salt accumulation. Among these three opening ratios, the treatment of 9.97% caused relatively high salt accumulation on the soil surface and large groundwater evaporation. The moisture content in soil profile kept relatively stable, but the groundwater evaporation intensity decreased with the increase of time for different opening ratios, which could be attributed to that the salt crusts in soil surface were developed in the initial evaporation phase and they in return inhibited the water evaporation. The effect of opening ratios on salt movement was different for various ions, in which, the accumulation of  $\text{Cl}^-$  was influenced more remarkably by opening ratios than that of  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ .

**Keywords:** opening ratio of film; groundwater evaporation; soil water-salt transport

收稿日期: 2012-10-27

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301102); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(201130103-3); 陕西省自然科学基金研究计划项目(S2012JC7610); 陕西省教育厅基金(11JS076)

作者简介: 史文娟(1972—), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源高效利用方面的研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn.

土壤盐渍化问题始终是制约干旱地区农业发展的重要障碍,也是影响绿洲农业生态系统稳定性的重要因素<sup>[1]</sup>。盐渍化的重要机制是地下水和深层土壤中可溶盐在蒸发作用下不断向表土聚集<sup>[2-3]</sup>。新疆地区降雨稀少,蒸发却十分强烈,特别是在地下水浅埋区,因潜水蒸发而导致的土壤次生盐碱化问题也尤为突出<sup>[4-6]</sup>。近年来覆膜种植技术因其具有增温、保墒、节水、抑盐等作用而在新疆地区得以迅速发展和推广应用<sup>[7-10]</sup>,然而田间地膜覆盖率一般达不到100%,因为播种后作物破土时需预留出苗孔,覆膜灌溉时也需要考虑增设灌水孔<sup>[11]</sup>。因此便涉及到“覆膜开孔率”(即膜孔总面积与相应的薄膜截面积之比)的问题<sup>[12]</sup>。不同覆膜开孔率对于土表水分蒸发来说意味着不同的边界条件,因此其潜水蒸发和土壤水盐运移特征也会受到影响。

对于覆膜开孔条件下的蒸发问题,李毅等<sup>[13-14]</sup>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一些研究。门旗等<sup>[15]</sup>研究了覆膜开孔率对土壤蒸发的影响,并通过大田试验加以验证。但这些研究均未考虑地下水对土壤水盐运移的影响。同时,在实际生产中,由于干旱盐渍土区采用膜孔或膜下滴灌的农田种植面积更大,加之盐渍土区的地下水位埋深也相对较浅,潜水蒸发较为强烈。基于此,本文通过室内模拟实验,对地下水浅埋区,不同覆膜开孔率条件下盐渍土壤的潜水蒸发和水盐运动规律进行了深入研究,旨在为盐渍土区田间膜孔灌溉技术提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

实验装置系统由土柱、供水装置、红外灯3部分组成。土柱为有机玻璃,高60 cm、直径14 cm。土柱两边各开一排(共两排)直径为2 cm的取样孔,上下

孔心之间间隔为5 cm,土柱底部设石英砂反滤层和排气孔;地下水埋深50 cm,蓄水层厚度为10 cm;“马氏瓶”用于供水并控制其水位,同时测定潜水蒸发量;蒸馏水作为蒸发水源,250 W的红外灯用于模拟不同强度的稳定蒸发。

试验所用土壤选自新疆石河子兵团垦区盐碱地的混合土样,土质为粉质壤土。土样经过风干、碾压、去除根系等杂物,过孔径为2 mm筛,混合均匀后,按 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的设计容重分层均匀装入试验土柱。为使土柱各处容重一致,每次装土厚度控制在5 cm,并且在土层之间进行刨毛。

试验在毛管上升水到达土表并趋于稳定(马氏瓶的日耗水量小于 $1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )之后开始蒸发,并以此作为开始蒸发的时间。所用蒸发水源为蒸馏水,采用马氏瓶进行自动供水,潜水埋深为50 cm,大气蒸发能力根据新疆地区返盐量最大时的实际情况设为 $31.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。三种覆膜开孔率分别为3.24%、9.97%和20.27%,裸土蒸发作为对照处理,每个处理2个重复。利用红外灯日夜照射,整个试验历时10 d。在蒸发过程中,每日8时通过“马氏瓶”观测各处理的潜水蒸发量;蒸发期间取土孔用橡皮塞封堵,蒸发结束通过土柱两边的取土孔取土分别进行水分和盐分的测定,同一高度位置的取样视为一个重复,由于每个处理本身有2个重复,因此,同一位置的盐分和水分含量为4个测定结果的平均值。

测试土壤溶液为1:5的土水比浸提液。土壤全盐量通过电导仪测定。 $\text{Na}^+$ 通过原子吸收分光光度计测定, $\text{SO}_4^{2-}$ 采用紫外分光光度计测定, $\text{Cl}^-$ 则采用 $\text{AgNO}_3$ 滴定法测定,土壤质地采用离心机测定。土壤的机械组成见表1,土壤的初始化学性质及离子组成见表2。

表1 供试土壤的机械组成

Table 1 Particle size of the experimental soil

土壤种类 Soil sort	小于某粒径的颗粒含量/% Content of particles smaller than the following size									中值粒径/mm Median size	有效粒径/mm Effective size
	3.0 mm	1.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.1 mm	0.05 mm	0.01 mm	0.005 mm	0.001 mm	$D_{50}$	$D_{10}$
粉质壤土 Silty loam	100	99.8	99.4	96.5	66.7	47.5	36.0	27.5	12.5	0.065	0.001

表2 供试土样的初始化学性质及离子组成

Table 2 Chemical character and ion composition of the experimental soil

土壤种类 Soil sort	电导率 Conductivity $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	pH	离子 Ion/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			盐土分类 Saline soil classification	盐化程度 Salinization degree
			$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		
粉质壤土 Silty loam	1093	8.2	656.6	170.05	330.41	氯化物硫酸盐土 Chloride and sulfate soil	强盐化土 Severe salinization

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆膜开孔率对潜水蒸发的影响

覆膜种植是干旱区农田节水的重要途径,覆膜种植条件下土壤水盐运移的初始和边界条件都发生了变化,进而会直接影响到水盐运移的特性。不同覆膜开孔率(裸土为 100%)条件下的潜水累积蒸发量和潜水蒸发强度随时间的变化规律分别如图 1 和 2 所示。

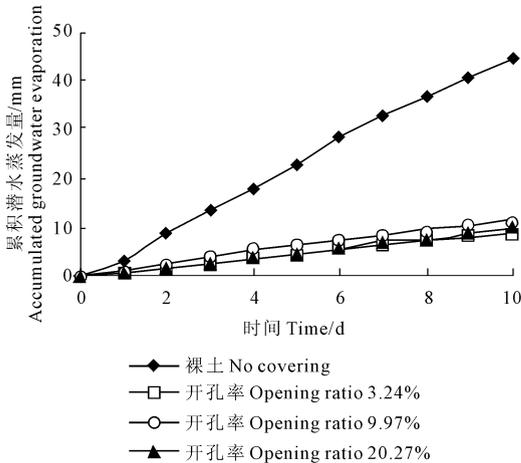


图 1 不同开孔率条件下累积潜水蒸发量与时间的关系

Fig.1 Change of accumulated groundwater evaporation under different opening ratios

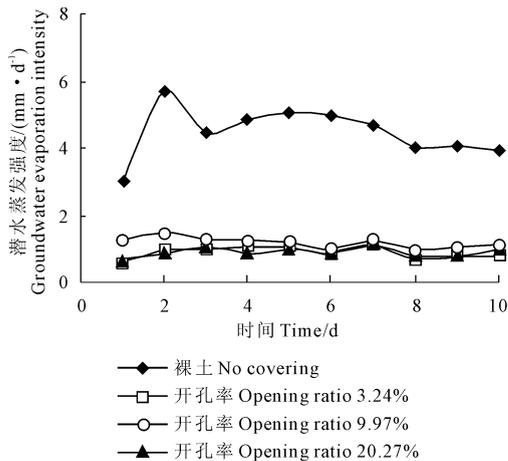


图 2 不同开孔率条件下潜水蒸发强度随时间的变化

Fig.2 Change of groundwater evaporation intensity under different opening ratios

由图 1 可见,与裸土相比,覆膜对潜水蒸发有非常显著的抑制作用,且随蒸发历时的延长,其抑制作用越来越明显。蒸发初期,各覆膜开孔率条件下的累积潜水蒸发量均与蒸发历时呈线性关系,试验中后期,累积潜水蒸发量的增加幅度有不同程度的下降。对于不同覆膜开孔率的土壤,达到同一累积潜

水蒸发量所需的时间不同:开孔率越大,所需时间则越短。但与裸土相比,覆膜开孔率分别为 3.24%、9.97% 和 20.27% 的土壤潜水累积蒸发量分别减小了 79.87%、74.19% 和 77.93%,可以看出,开孔率为 20.27% 的累积潜水蒸发量小于开孔率为 9.97% 的累积潜水蒸发量。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,土壤表面积累的盐分较多,形成的盐壳较厚,盐壳反过来又阻滞了潜水蒸发,这从图 2 可以得到证实,也与非盐土潜水蒸发的结论有所不同。而对于另两种开孔率较小的情况,虽然盐分也有表聚现象,但对水分蒸发的抑制作用不明显。

由此可见,通常情况下(即非盐土或含盐量较低的土壤条件下),开孔率越小,覆膜对水分蒸发的抑制作用越强,但对于含盐量较高的土壤来说,当开孔率超过一定数值时,土表面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潜水蒸发量的减少幅度反而增大。

### 2.2 不同覆膜开孔率对土壤剖面水分分布的影响

蒸发过程必然伴随土壤含水量的变化。图 3 为蒸发结束时不同覆膜开孔率条件下土壤剖面含水量的变化情况。

从图 3 可以看出,当蒸发结束时,土壤含水量随土层深度增加而逐渐增加,在接近 50 cm 处,含水量接近饱和含水量( $0.48 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。不同开孔率条件下,土壤含水量的变化相对较小,这与地下水埋深较浅,土面蒸发近似于稳定蒸发有关。

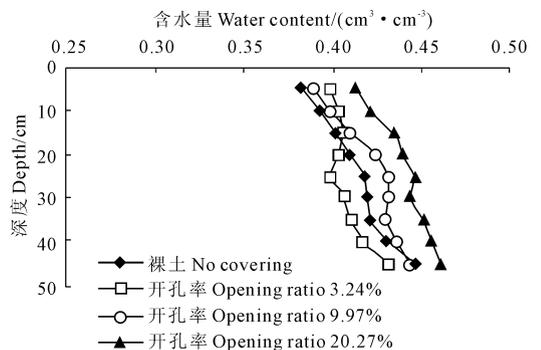


图 3 蒸发结束时不同覆膜开孔率土壤剖面含水量变化

Fig.3 Changes of water content in soil profile under different opening ratios

### 2.3 不同覆膜开孔率对土壤盐分迁移的影响

2.3.1 土壤剖面全盐量变化特征 土壤中盐分主要是通过改变渗透势来影响作物的生长发育。蒸发结束后不同开孔率土壤剖面的盐分变化特征如图 4 所示。

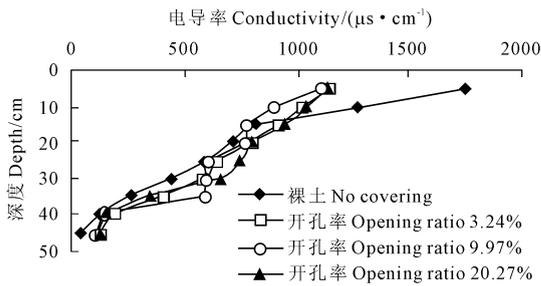


图4 不同覆膜开孔率土壤剖面电导率变化

Fig.4 Changes of conductivity in soil profile under different opening ratios

由图4可知,在覆膜情况下,浅层土壤总盐分含量比裸土明显减少,当开孔率分别为3.24%、9.97%和20.27%且在蒸发10 d时,土层深度5 cm范围内土壤全盐量分别减小了36.93%、34.41%和35.16%,可见,覆膜具有很好的抑制盐分上移的作用,在农田中使用地膜覆盖能够有效地防止土壤次生盐碱化。蒸发结束时,三种不同覆膜开孔率条件下,深层土壤剖面的盐分逐渐减小,即随着蒸发的进行,深层土壤盐分不断地随水分向上迁移,并在土表聚集,致使土壤中盐分含量逐渐下降,土层越深,降低幅度越大。比较三种开孔率条件下的土壤电导率可以发现,当覆膜开孔率为9.97%时,土壤浅层含盐量减少的幅度最大,这与其潜水蒸发量相对较大,表层集聚的盐分相对较多有关。由此可以判断,并不是开孔率越小对盐分运移的抑制作用越显著,对于开孔率而言,存在一个临界值,超过或低于此开孔率,其土表返盐量均减小,但此结论需进一步印证。

以上结果与不考虑地下水条件下盐渍土壤累积蒸发量及表层返盐量随开孔率增加而增加<sup>[13-14]</sup>的研究结果不同。在地下水埋深较浅条件下,土壤盐分在蒸发水流驱动下不断从深层土壤向表层土壤积聚,很容易使得表层形成盐壳并反过来影响水分的进一步蒸发和盐分的表聚。盐壳越厚,反抑制作用越大,因而开孔率越大其后期潜水蒸发量及返盐量也将有所减小。不考虑地下水条件下,土壤水分的供应能力有限,因而盐分的表聚作用相对较弱,盐分的反抑制作用也相对较小,因此一定开孔率条件下,盐分表聚主要受制于开孔率。

### 2.3.2 土壤剖面盐离子变化特征

#### (1) 土壤剖面 Na<sup>+</sup> 浓度的变化特征

土壤中不同盐离子对作物的生长影响不同。不同开孔率土壤剖面 Na<sup>+</sup> 浓度变化情况如图5所示。

图5显示,三种开孔率情况下,越接近土表,Na<sup>+</sup> 浓度越高,且沿着土壤剖面深度的增加逐渐降

低。在蒸发结束时,覆膜处理下的 Na<sup>+</sup> 含量比裸土条件下的低,主要表现在土层深度15 cm范围,在15 cm以下土层土壤中,Na<sup>+</sup> 含量与裸土情况基本相同,可知虽然开孔率不同,但该离子运移特征相似。当开孔率分别为3.24%、9.97%和20.27%时,5 cm深度 Na<sup>+</sup> 浓度分别减小了24.96%、23.99%和24.77%,可见其变幅相差无几,因此可知土壤浅层中 Na<sup>+</sup> 浓度受开孔率影响不大。

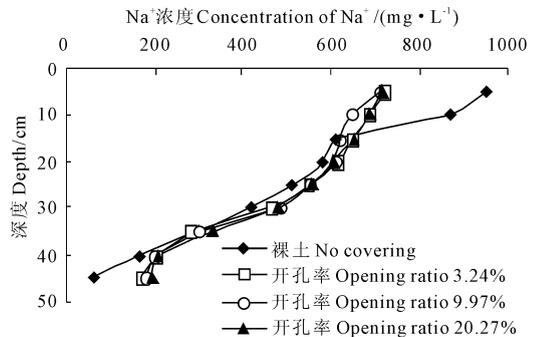


图5 不同覆膜开孔率土壤剖面 Na<sup>+</sup> 浓度变化

Fig.5 Changes of concentration of Na<sup>+</sup> in soil profile under different opening ratios

#### (2) 土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 浓度的变化特征

蒸发结束时,不同开孔率土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 浓度变化情况如图6所示。

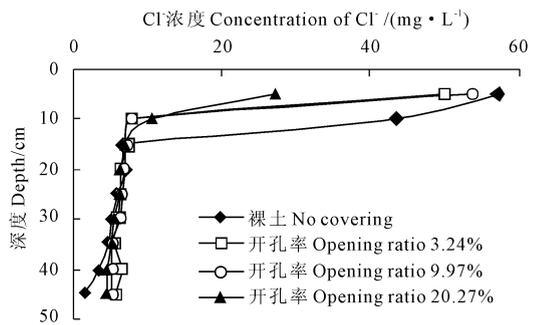


图6 不同覆膜开孔率土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 浓度变化

Fig.6 Changes of concentration of Cl<sup>-</sup> in soil profile under different opening ratios

从图6可以看出,蒸发结束时,覆膜情况下的浅层土壤中 Cl<sup>-</sup> 含量均比裸土小,并且土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 浓度均随着深度的增加而减小,在10 cm土层深度范围内表现得更为明显,15~45 cm土层深度范围内变化不是很大。说明覆膜可以有效减少 Cl<sup>-</sup> 的表聚作用。同时可以看出,对于开孔率分别为3.24%、9.97%和20.27%的处理,5 cm土层处 Cl<sup>-</sup> 含量比与裸土分别减少了12.50%、5.96%和52.36%,可见其变幅较大,说明 Cl<sup>-</sup> 表聚作用的强弱受开孔率影响极为显著。

### (3) 土壤剖面 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度的变化特征

蒸发结束时,不同开孔率土壤剖面  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度变化情况如图 7 所示。

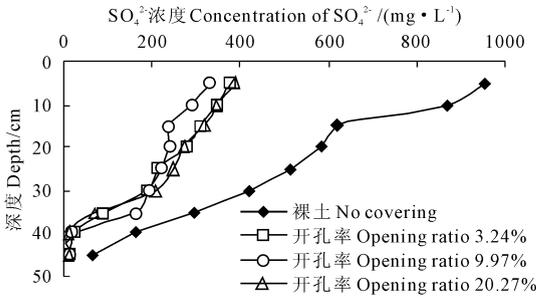


图 7 不同覆膜开孔率条件下土壤剖面  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度变化

Fig.7 Changes of concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  in soil profile under different opening ratios

从图 7 可以看出,蒸发结束时, $\text{SO}_4^{2-}$  浓度沿着土壤剖面从浅至深呈现逐渐减小趋势,而且与裸土相比,上层土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度减小幅度明显大于下层土壤,说明覆膜起到了阻碍  $\text{SO}_4^{2-}$  表聚的作用。对于覆膜开孔率分别为 3.24%、9.97% 和 20.27% 的处理,土层 5 cm 深度处其含量分别减少了 60.72%、65.33% 和 59.59%,其减少量相差不大,可见土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  迁移受开孔率影响不大。

对比以上不同盐离子的运移特征可以看出,覆膜可以有效地抑制盐离子上移,但开孔率对  $\text{Cl}^-$  表聚作用的影响明显大于对  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  表聚的影响。

## 3 结 论

通过对 3.24%、9.97% 和 20.27% 三种覆膜开孔率条件下潜水蒸发和土壤水盐运移特性的研究,得出以下结论:

1) 与不覆膜相比,覆膜对潜水蒸发和土表返盐均有明显抑制作用,但其抑制程度与开孔率并无显著正相关关系。对于高盐土而言,在地下水埋深较浅条件下,大量盐分表聚后形成了盐壳,而盐壳反过来又在一定程度上抑制了潜水的蒸发。

2) 蒸发结束时,不同开孔率条件下,土壤含水量变化相对较小;对于开孔率分别为 3.24%、9.97%

和 20.27% 的情况,潜水累积蒸发量分别减少了 79.87%、74.19% 和 77.93%,土壤浅层全盐量分别减少了 36.93%、34.41% 和 35.16%。可见,覆膜开孔率的差异对盐分累积的影响小于对潜水蒸发的影响。三种开孔率中,9.97% 的处理土表积盐量和潜水蒸发量均相对较大。

3) 覆膜对不同盐离子的阻滞作用不同,其中,  $\text{Cl}^-$  表聚作用受开孔率影响较大,而  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的表聚作用受开孔率影响表现的不是很明显。

## 参 考 文 献:

- [1] 郗金标,张福锁,毛达如,等.新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J].土壤通报,2005,36(3):299-303.
- [2] 史文娟,汪志荣,沈冰.夹砂层土壤水盐运移实验研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010:1-10.
- [3] 缙倩倩,韩致文,王国华.中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展[J].中国农学通报,2011,27(29):246-250.
- [4] 史文娟,沈冰,汪志荣,等.蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J].农业工程学报,2005,21(9):23-26.
- [5] 王密侠,李新.北方旱区地下水位调控与盐渍化防治[J].地下水,1994,16(4):172-174,185.
- [6] 史文娟,沈冰,汪志荣,等.夹砂层状土壤潜水蒸发特性及计算模型[J].农业工程学报,2007,23(2):17-20.
- [7] 周和平,徐小波,兰玉军.膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J].节水灌溉,2006,(4):8-10.
- [8] 张伟,吕新,李鲁华,等.新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J].农业工程学报,2008,24(8):15-19.
- [9] 殷波,柳延涛.膜下长期滴灌土壤盐分的空间分布特征与累积效应[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):228-231.
- [10] 张德奇,廖允成,贾志宽.旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213.
- [11] 李毅,邵明安,王文焰,等.覆膜不同开孔程度蒸发条件下土壤水热变化动态研究[J].土壤学报,2004,41(3):387-393.
- [12] 王春霞,王全九,庄亮,等.干旱区膜下滴灌条件下膜孔蒸发特征研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):14-21.
- [13] 李毅,王全九,王文焰.覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):187-193.
- [14] 李毅,王全九,王文焰.覆膜开孔土壤蒸发实验研究[J].应用生态学报,2005,16(3):445-449.
- [15] 门旗,李毅,冯广,等.地膜覆盖对土壤裸间蒸发影响的研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):17-20.