

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.010

# 覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响\*

高金芳 李毅 陈世平 马孝义

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**【摘要】** 通过不同高度土体在不同覆膜开孔率条件下的室内蒸发试验,研究了土体高度变化时水盐分布的差异与相互联系。试验结果表明,不同高度土体的单位深度累积蒸发量与时间变化符合 Gardner 理论关系,单位深度累积蒸发量与时间和土体总高度存在二元线性函数关系;单位深度累积蒸发量和单位膜孔面积单位深度累积蒸发量均与土体高度和覆膜开孔率存在较好的函数关系;土体高度越小,单位深度含盐量和盐分浓度变化幅度越大,土体高度是影响盐分上行的影响因素之一;覆膜开孔限制土壤水分蒸发速度进而影响土体盐分表聚,因此减小覆膜开孔率可以有效减少土体盐分表聚。

**关键词:** 覆膜开孔率 土体高度 单位深度累积蒸发量 水盐运移

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)09-0050-06

## Effects of Soil Column Heights on Movement of Soil Water and Soil Salt during Evaporation under Perforated Plastic Mulch

Gao Jinfang Li Yi Chen Shiping Ma Xiaoyi

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

### Abstract

Through laboratory evaporation experiments of soil column with different heights and mulched at different open-hole ratios, the difference of the distributions of soil water and soil salt and their connections were studied at different heights of soil column. The results showed that, the variations between cumulative evaporation at unit depth and evaporation time fit Gardner's theory for all the soil column heights. There were 2-variable linear functions between cumulative evaporation at unit depth, evaporation time and total soil height. There was relatively good relationship between cumulative evaporation at unit depth and total soil height as well as open-hole ratios. There were also relatively good relationship between cumulative evaporation at unit depth by unit area of film holes and total soil height as well as open hole ratios. The smaller the total soil height, the larger the variation ranges of soil salt content at unit depth and soil salt concentration. The total soil height was a factor that influenced on upward movement of soil salt. Because plastic mulch with open holes restrained soil water evaporation rates and also affected accumulation of soil salt on soil surface, it was effective to decrease soil salt accumulation on soil surface by decreasing open-hole ratios of plastic.

**Key words** Open-hole ratio, Soil height, Cumulative evaporation of unit depth, Soil water and soil salt movement

收稿日期: 2009-10-15 修回日期: 2009-12-11

\* 国家自然科学基金资助项目(50709028)

作者简介: 高金芳, 硕士生, 主要从事农业水资源利用研究, E-mail: lafang\_020@163.com

通讯作者: 李毅, 副教授, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: liyikitty@126.com

## 引言

蒸发条件下,土表含水率变化较明显,覆膜开孔改变了土壤水分垂直蒸发的上边界条件<sup>[1]</sup>。盐渍土的水盐运动研究证明,土壤水分蒸发量与土壤盐分表聚直接相关<sup>[2]</sup>。覆膜开孔是覆膜种植过程中为利于植物破孔出苗和进行灌溉所人为形成的<sup>[3]</sup>,但开孔率会影响土面蒸发特性和土壤水分的有效性,对蒸发过程中的土壤水盐迁移有重要影响。

由于田间土壤水分蒸发的复杂性,准确、长期观测田间土壤水分蒸发过程需要投入大量的人力和设备,而运用解析和数值方法进行不同深度土壤水分蒸发过程的模拟虽然也有一定的实用性,但同样过程繁冗。因此,寻求不同深度土壤水分蒸发特征之间的联系,并应用于蒸发的定量分析是必要的。以往国内外对于覆膜开孔条件下的蒸发研究较少<sup>[4-7]</sup>,且研究没有涉及土体高度对覆膜开孔蒸发水盐运移的影响。为此,本文在控制大气蒸发能力不变条件下,对4组不同高度的土柱,进行6种覆膜开孔率条件下的蒸发试验,分析覆膜开孔蒸发条件下土壤水分和盐分与土体高度的定量关系,从而得到土体高度和覆膜开孔率两因素综合作用下水盐运移规律,旨在为覆膜改良盐渍土提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样的基本性质

供试土样选自新疆玛纳斯县。土样经碾压、粉碎、风干、过筛后测定其基本物理特性。采用激光粒度仪测得土样中的粘粒、粉粒、砂粒含量分别为14.1%、46.9%和39.0%,参照国际土壤质地分类系统属粉砂质壤土。采用烘干法测定风干含水率,并用环刀装土,用水饱和后测饱和含水率,所测土壤风干和饱和含水率分别为0.043、0.415 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。取烘干土样10 g,用1:5的土水比配制浸提液,振荡30 min后静置24 h,用移液管抽取30 mL溶液后,采用水浴烘干后称量,测得土壤初始含盐量为29.3 mg/g。

### 1.2 试验方法

覆膜开孔蒸发的试验系统包括土柱、加热系统以及称量系统。土柱材料采用PVC管加工而成,直径均为8.4 cm,壁厚0.2 cm,高度分别为2、5、10和20 cm。对同一高度选定6个不同的覆膜开孔率同时进行蒸发试验,土表覆膜开孔率为覆膜开孔总面积与土体横截表面积之比<sup>[4,8]</sup>,试验所选的表土覆膜开孔率分别为0(全覆膜)、0.69%、2.78%、7.71%、18.70%和100%(不覆膜),其中开孔率为

0.69%时孔径为1 mm,2.78%、7.71%和18.70%时孔径相同均为2 mm,膜孔呈梅花状等间距分布,如图1所示。加热系统采用250 W远红外灯,在试验过程中强度稳定,蒸发试验中土柱与供热源间距固定为30 cm。在蒸发同期用与土柱横截面积相同的蒸发皿测定水面蒸发量,测得本试验条件下的外界大气蒸发能力为0.001 cm/min。环境温度保持在(25±3)℃。

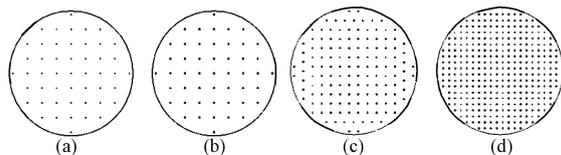


图1 覆膜开孔率分布

Fig. 1 Distribution of open-hole ratios

(a) 开孔率0.69% (b) 开孔率2.78%  
(c) 开孔率7.71% (d) 开孔率18.70%

土样初始含水率配置成0.326 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,混合均匀后,按照设计密度(1.35 g/cm<sup>3</sup>)分层均匀装入土柱。试验过程中,按照一定观测时间间隔测定土柱质量,土柱放在电子天平(LP2102,灵敏度0.01 g)上称量,以便测定土柱质量在蒸发过程中的变化。当连续3次测定的裸土蒸发量变化不明显时结束蒸发,随即得到高度为2、5、10及20 cm土柱所用的蒸发时间分别是2 070、4 260、5 700和7 740 min。蒸发停止后立即在土体不同深度取土,烘干法测定土样含水率。将烘干土样粉碎、研磨混合均匀后,取10 g土样,以1:5土水比浸提。对每一个样品振荡25 min后静置24 h,提取表层溶液30 mL后,采用烘干法测定含盐量。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤蒸发的水分特征

#### 2.1.1 土体高度对单位深度累积蒸发量的影响

对于不同土体高度的土壤来说,土体高度影响蒸发过程中土壤供水能力,土壤含水率随着土体高度变化差别较大。土体高度的变化致使蒸发后期土柱蒸发量发生较为显著的变化,不同高度土体在温度势梯度较大区域即土壤表层水分变化较明显。研究证实,累积蒸发量与时间平方根成正比<sup>[9-14]</sup>,即

$$E = \alpha t^{1/2} \quad (1)$$

式中  $E$ ——累积蒸发量,cm

$\alpha$ ——与土壤性质有关的系数

$t$ ——蒸发时间,min

经分析,定义单位深度累积蒸发量为不同时刻累积蒸发量与土体高度的比值,即

$$E_{dw} = E/H \quad (2)$$

式中  $E_{dw}$ ——单位深度累积蒸发量, g/cm  
 $H$ ——土体高度, cm

不同土体高度的单位深度累积蒸发量随时间变化趋势符合上述关系。图2显示了裸土在不同土体高度时的单位深度累积蒸发量随时间变化趋势, 裸土的单位深度累积蒸发量随着土体高度的增加急剧减小, 土体高度越小单位深度累积蒸发量变化越大。20 cm 单位深度累积蒸发量与 10 cm 土柱 2 100 min 时的单位深度累积蒸发量相差 1.3%, 与 5 cm 土柱 780 min 时的单位深度累积蒸发量相差 1.5%, 与 2 cm 土柱 300 min 时的单位深度累积蒸发量相差 2.3%; 10 cm 单位深度累积蒸发量分别与 5 cm 土柱 1 600 min 时的单位深度累积蒸发量相差 -0.26%, 与 2 cm 土柱 480 min 时的单位深度累积蒸发量相差 -1.33%; 5 cm 单位深度累积蒸发量与 2 cm 土柱 840 min 时的单位深度累积蒸发量相差 0.13%。土柱高度越小, 单位深度累积蒸发量差别越小。单位深度累积蒸发量越小, 不同土体高度的蒸发时间呈直线剧减。土柱高度增加其蒸发时间依次累积增加, 不同高度土体的单位深度累积蒸发量与时间符合线性关系

$$E_{dw} = At^{1/2} - B \quad (3)$$

式中  $A$ 、 $B$ ——拟合参数

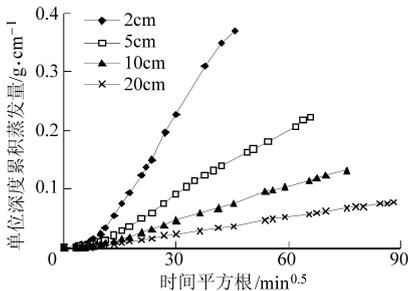


图2 单位深度累积蒸发量随土体高度变化

Fig. 2 Variation of cumulative evaporation for unit depth with soil height

不同土体高度的  $A$  和  $B$  的拟合值见表1。

表1  $E_{dw} - H$  线性函数关系的参数随土柱高度变化值

Tab. 1 Parameter variations with different heights of soil for  $E_{dw} - H$  power function

土体高度/cm	$A$	$B$	$R^2$
2	0.009 0	0.046 7	0.979 1
5	0.003 7	0.020 0	0.993 1
10	0.001 9	0.010 6	0.995 1
20	0.000 9	0.005 0	0.997 3

由表1可见, 不同土体高度的拟合参数  $A$ 、 $B$  随土体高度的增加急剧减小, 土体高度越大, 线性关系拟合相关系数越高。将  $A$ 、 $B$  随着土体高度变化回

归得到其函数表达式

$$A = 0.018 2H^{-0.995 3} \quad (R^2 = 0.999 3) \quad (4)$$

$$B = 0.093 1H^{-0.963 5} \quad (R^2 = 0.998 5) \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3), 则裸土的  $E_{dw}$  可表示为土体高度和时间的函数

$$E_{dw} = 0.018 2H^{-0.995 3} t^{1/2} - 0.093 1H^{-0.963 5} \quad (6)$$

### 2.1.2 土体高度和覆膜开孔率对单位深度累积蒸发量的影响

蒸发条件下, 水分分别以液态和气态在土壤剖面中运移, 水蒸气在土壤中向着水蒸气压梯度减小的方向即土壤表层运移。覆膜开孔在不同程度上阻挡了土壤水分的垂直蒸发。蒸发开始一段时间内表层水分变化较大, 土壤蒸发速度较快, 表层干燥也较快, 土壤热梯度差的存在使之深层水分上升<sup>[15-18]</sup>。覆膜开孔条件下不同土体高度的单位深度累积蒸发量随时间变化趋势符合 Gardner 理论关系, 对于不同的覆膜开孔率, 蒸发系数不相同。

图3显示了10 cm 高度土柱在不同覆膜开孔率条件下的单位深度累积蒸发量随时间变化趋势, 蒸发初期蒸发速度较大, 经过一段时间蒸发强度趋于稳定, 稳定蒸发持续时间较长, 不覆膜时累积蒸发量最大, 全覆膜的蒸发速度一直保持在一个恒定值, 基本没有变化; 对不同覆膜开孔率条件下不同高度土柱的单位深度累积蒸发量进行比较可知, 不同高度土柱的单位深度累积蒸发量变化趋势一致。对于不同土体高度和覆膜开孔率, 蒸发系数不同。表2为根据实测资料计算得出的土体高度和覆膜开孔率影响的蒸发系数  $\alpha$  值。

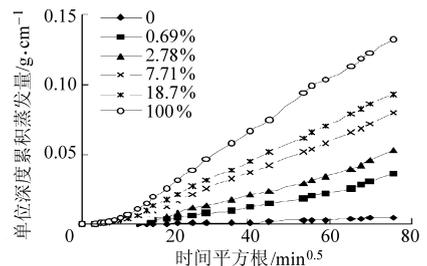


图3 单位深度累积蒸发量的变化

Fig. 3 Variation of cumulative evaporation unit depth

由表2可见, 对不同高度土柱, 开孔率为0(全覆膜)时的蒸发系数  $\alpha$  均不为0, 其原因主要在于蒸发表层存在水蒸气梯度导致表层土壤水以气态形式逃逸, 在蒸发过程和取土时向外散失引起误差; 当覆膜开孔率由0增至100%时, 不同高度土柱的蒸发系数逐渐增加。以全覆膜蒸发系数  $\alpha_0$  为基础值, 将表1中不同高度土柱的0~100%覆膜开孔蒸发得出的蒸发系数与  $\alpha_0$  相减, 可得  $\alpha - \alpha_0$  值, 不同高度土

柱的  $\alpha - \alpha_0$  也随覆膜开孔率的增大而增大,不同高度土柱的  $\alpha - \alpha_0$  值与覆膜开孔率的关系可以用对数关系表示为

$$\alpha - \alpha_0 = C \ln u + D \quad (7)$$

式中  $u$ ——覆膜开孔率, %

$C, D$ ——拟合参数

$\alpha_0$ ——全覆膜的蒸发系数,其值变化很小取其中间值 0.0003

表2 不同覆膜开孔率和土体高度影响下的蒸发系数  $\alpha$   
Tab.2 Evaporation coefficients  $\alpha$  influenced by different open-hole ratios and heights of soil

土体高度 /cm	覆膜开孔率 / %					
	0	0.69	2.78	7.71	18.70	100
2	0.0005	0.0023	0.0041	0.0055	0.0069	0.0090
5	0.0003	0.0011	0.0016	0.0023	0.0028	0.0037
10	0.0002	0.0006	0.0009	0.0012	0.0015	0.0020
20	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009

图3显示了不同高度土柱  $\alpha - \alpha_0$  随  $u$  变化的趋势,土柱高度越小,  $\alpha - \alpha_0$  随开孔率的变化幅度越大,高度为 10、20 cm 土柱的  $\alpha - \alpha_0$  随开孔率的变化幅度越相近。对  $\alpha - \alpha_0$  与  $u$  可采用对数关系进行拟合,不同土体高度的相关系数均大于 0.977。分析图4中土体高度的对数函数可知,参数  $C, D$  随土体高度  $H$  的增大而减小,可用指数函数关系表示为

$$C = 0.0013e^{-0.1347H} \quad (R^2 = 0.9317) \quad (8)$$

$$D = 0.0021e^{-0.1263H} \quad (R^2 = 0.8950) \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7),再将(7)代入式(1)可得出时间、覆膜开孔率及土体高度3因素影响下的单位深度累积蒸发量的函数关系

$$E_{dw} = (0.0013e^{-0.1347H} \ln u + 0.0021e^{-0.1263H} + 0.0003) t^{1/2} \quad (10)$$

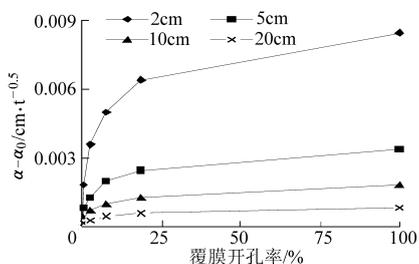


图4 不同高度土柱  $\alpha - \alpha_0$  随覆膜开孔率的变化趋势

Fig.4 Variations of  $(\alpha - \alpha_0)$  with open-hole ratios for different heights of soil

将式(10)对时间求导数,可得单位深度蒸发强度  $e_{dw}$  随时间、覆膜开孔率及土体高度变化的函数形式

$$e_{dw} = (0.0007e^{-0.1347H} \ln u + 0.0011e^{-0.1263H} + 0.0002) t^{-1/2} \quad (11)$$

式(11)可用于计算某一时刻覆膜开孔率的单位深度累积蒸发量及单位深度蒸发强度。

### 2.1.3 土体高度和覆膜开孔率对单位膜孔面积单位深度累积蒸发量的影响

将某一覆膜开孔率条件下的单位深度累积蒸发量与覆膜开孔总面积之比定义为单位膜孔面积单位深度累积蒸发量 ( $E_r$ )<sup>[5,19]</sup>。实测资料分析表明,  $E_r$  随覆膜开孔率增大而急剧减小;覆膜开孔率为 0 ~ 100% 时,不同土体高度条件下的  $E_r$  数量级变化较大,由于初始水盐均匀的覆膜蒸发中,  $E_r$  随覆膜开孔率变化的关系采用乘幂关系拟合的相关系数很高,因此仍采用该函数拟合不同土体高度的  $E_r$  随开孔率变化趋势

$$E_r = Fu^S \quad (12)$$

式中  $F, S$ ——拟合参数

$F$  为开孔率为 0 的  $E_r$ ;  $S < 0$ ; 不同土体高度条件下  $F, S$  的拟合值见表3。

表3  $E_r - u$  幂函数关系参数随土柱高度变化值  
Tab.3 Parameter variations with different heights of soil for  $E_r - u$  power function

土体高度/cm	$F$	$S$	$R^2$
2	0.2361	-0.7552	0.9965
5	0.1408	-0.7549	0.9971
10	0.0745	-0.7825	0.9972
20	0.0530	-0.7742	0.9975

由表3可见,不同土体高度的  $F$  随土体高度的增加急剧减小,而参数  $S$  变化很小取其平均值,由于式(12)中指数为负,因此开孔率在 0 ~ 100% 时,开孔率越小,  $E_r$  越大;土体高度越大,曲线变化幅度越小。将  $F$  随土体高度变化回归得到其函数表达式

$$F = 0.3836H^{-0.6717} \quad (R^2 = 0.9878) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),则  $E_r$  可表示为开孔率和土体高度的函数

$$E_r = 0.3836H^{-0.6717} u^{-0.7667} \quad (14)$$

## 2.2 土壤蒸发的盐分特征

### 2.2.1 不同土体高度盐分的变化

水是土壤盐分的携带者,同时又是土壤盐分运动的动力。土壤水分蒸发速率越大,携带的盐分上移量越多,土壤盐分的表聚现象越严重。由于蒸发初始土体剖面含盐量均一,因此表土盐分累积会使下层含盐量降低,表层一定范围形成 T 型积盐区<sup>[20-21]</sup>。蒸发中剖面水分和盐分的运动变化必然导致土壤中盐分浓度的变化,土壤盐分浓度综合反映了含水率和含盐量特征。裸土蒸发结束后不同高度土柱单位深度含盐量和盐分浓度分布如图5所示。

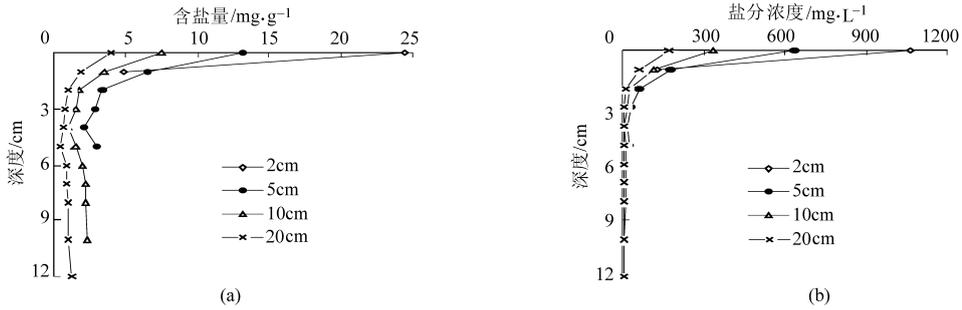


图5 不同高度土柱含盐量、盐分浓度分布

Fig. 5 Distributions of soil salt content and soil salt concentration for different heights of soil

由图5可见:蒸发致使不同高度土柱表层0 cm 积盐最多,单位深度含盐量随着土体高度增加反而减小,2 cm 和5 cm 高度土柱的含盐量随深度递减,其单位深度含盐量最小值比其他高度土柱最小值大;不同高度土柱单位深度含盐量在5 cm 深度时降至最低,在单位深度含盐量最小值以下,随深度增加单位深度含盐量缓慢增加,土柱底部的单位深度含盐量基本不变化;不同高度土柱单位深度盐分浓度变化趋势一致,土柱高度越小单位深度盐分浓度变化趋势幅度越大;不同高度土柱单位深度盐分浓度

在单位深度含盐量最低点处发生转折,表层至转折点盐分浓度随着深度增加急剧减少,转折点到土柱底部盐分浓度变化甚小。土体高度是影响盐分上行的影响因素之一。

### 2.2.2 不同覆膜开孔率条件下盐分的变化

蒸发结束后,不同覆膜开孔率条件下表层(0 cm)积盐非常明显,不同开孔率的蒸发表面均有不同程度的积盐,且随着开孔率增大单位深度含盐量也增加。图6显示了10 cm 土柱蒸发结束剖面单位深度含盐量和盐分浓度分布。

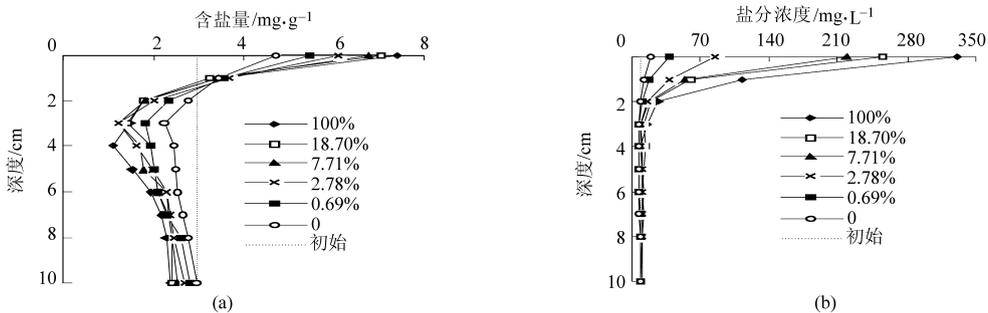


图6 覆膜开孔蒸发含盐量、盐分浓度分布

Fig. 6 Soil salt content distribution, soil salt concentration for evaporation under different aperture ratios

由图6可知,不同覆膜开孔条件下的单位深度含盐量最大值均在表层0 cm。在0~2 cm 随深度增加单位深度含盐量急剧减少,单位深度含盐量在3~4 cm 深度时降至最低,在5 cm 以下随深度增加单位深度含盐量增加缓慢,土柱底部的单位深度含盐量接近单位深度含盐量初始值,覆膜开孔率越大,土壤单位深度含盐量的最低点越深,裸土单位深度含盐量最小值出现在土表以下4 cm 处;不同覆膜开孔率条件下土壤单位深度盐分质量浓度在剖面上的变化较相似,均为表层单位深度盐分浓度最高,在3 cm 深度以下单位深度盐分浓度变化较小。这说明覆膜开孔限制土壤水分蒸发速度进而影响土体盐分表聚,蒸发速度的降低,相应地减少了土壤盐分向上运移的机会,大部分盐分依然滞留在下层,减小覆膜开孔率可以有效减少土体盐分表聚。

## 3 结论

(1)不同高度土体的单位深度累积蒸发量与时间变化符合裸土蒸发的 Gardner 理论关系,单位深度累积蒸发量越小,不同土体高度的蒸发时间呈直线剧减,不同高度土体的单位深度累积蒸发量与土体高度和时间符合线性函数关系。

(2)单位深度累积蒸发量与土体高度和覆膜开孔率存在对数函数关系,得出土体高度、开孔率及时间3 因素影响下的单位深度累积蒸发量函数关系;单位膜孔面积单位深度累积蒸发量可采用覆膜开孔率函数表达,根据土体高度和覆膜开孔率可确定单位膜孔面积单位深度累积蒸发量的乘幂关系。

(3)土柱高度越小单位深度含盐量和盐分浓度变化幅度越大,土体高度是影响盐分上行的影响因素之一;不同开孔率蒸发的单位深度含盐量随开孔率变化趋势一致,覆膜开孔限制土壤水分蒸发速度

进而影响土体盐分表聚,因此减小覆膜开孔率可以有效减少土体盐分表聚。

### 参 考 文 献

- 1 李毅,王全九,王文焰,等. 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.  
Li Yi, Wang Quanjiu, Wang Wenyan, et al. Distribution and movement characteristics of soil water and soil salt during evaporation from perforated plastic mulch[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 187~193. (in Chinese)
- 2 石元春,李韵珠,陆锦文. 盐渍土的水盐运动[M]. 北京:北京农业大学出版社,1986.
- 3 Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Open-hole effects of perforated plastic mulches on soil water evaporation[J]. Soil Science, 2003, 168(11): 751~758.
- 4 李毅,王全九,王文焰. 覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006.
- 5 范严伟,马孝义,王波雷,等. 膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(11):35~41.  
Fan Yanwei, Ma Xiaoyi, Wang Bolei, et al. Numerical simulation of soil wetting pattern moisture distribution and infiltration characteristics for film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 35~41. (in Chinese)
- 6 李韵珠,胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟[J]. 土壤学报,2004,41(4):493~502.  
Li Yunzhu, Hu Kelin. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 493~502. (in Chinese)
- 7 李毅,王文焰,王全九,等. 滴灌覆膜开孔蒸发三维空间水盐运移实验研究[J]. 土壤通报,2004,35(4):435~440.
- 8 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.  
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Dynamic variations of soil water and heat under evaporation conditions varying with aperture ratio of plastic mulch[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 387~393. (in Chinese)
- 9 Fritton D D, Don Kirkham, Shaw R H. Soil water evaporation, isothermal diffusion, and heat and water transfer[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1970, 34(2): 183~189.
- 10 Philip J R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil[J]. Journal of Meteorology, 1957, 14(4): 354~366.
- 11 Bachmann J, Horton R, Van der Ploeg R R. Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65(6):1599~1607.
- 12 Mahrer, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(2):362~367.
- 13 Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. Water Resour. Res., 1984, 20:1087~1098.
- 14 Lascano R J., van Bavel C H M. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50(5): 1127~1133.
- 15 原翠萍,张心平,雷廷武,等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(7):25~28.
- 16 孙景生,康绍忠,王景雷,等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):20~24.  
Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Wang Jinglei, et al. Experiment on soil evaporation of summer maize under furrow irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 20~24. (in Chinese)
- 17 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.  
Li Yi, Wang Quanjiu, Wang Wenyan, et al. Soil evaporation under perforated plastic mulch[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 445~449. (in Chinese)
- 18 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(10):171~173.  
Chen Suying, Zhang Xiying, Pei Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171~173. (in Chinese)
- 19 李毅,邵明安,王文焰,等. 不同灌水定额条件下的覆膜开孔蒸发实验研究[J]. 水科学进展,2004,15(3):357~363.  
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Experimental research on evaporation from perforated plastic mulch with different irrigation quotas[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3): 357~363. (in Chinese)
- 20 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- 21 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.