

# 覆膜不同开孔程度蒸发条件下土壤 水热变化动态研究\*

李 毅<sup>1,2</sup> 邵明安<sup>1,2</sup> 王文焰<sup>3</sup> 王全九<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘 要** 覆膜灌溉播前铺膜通常无法覆盖全田面, 而播种后需为作物破土预留出苗孔。覆膜灌溉时还需增设灌水孔, 对上述各类孔的问题, 可采用覆膜开孔率来统一表征。到目前为止, 尚未见国内外关于覆膜开孔蒸发的水热耦合迁移方面的报道。在研制了室内蒸发水热动态观测实验系统的基础上, 本文根据剖面初始含水率均匀的覆膜开孔蒸发土壤水分和温度的动态观测资料, 分析了土壤温度变化规律及剖面水分的降低趋势, 并建立了覆膜开孔蒸发的累积蒸发量、相对累积蒸发量及单位膜孔面积累积蒸发量随时间和不同覆膜开孔率变化的函数关系。分析结果表明, 不同覆膜开孔率控制下的累积蒸发量与时间平方根之间均符合 Gardner 提出的裸土蒸发理论关系。该结果发展了传统的 Gardner 方程, 拓展了该关系的应用途径, 对今后进一步研究覆膜开孔蒸发的水热运动规律有重要意义。

**关键词** 覆膜开孔率; 累积蒸发量; 水热耦合

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

覆膜种植技术近年来在新疆发展起来后, 已取得良好效果并得以大面积推广。覆膜灌溉播前铺膜一般无法覆盖全部田面, 因而土面覆膜率小于 100%, 而播种后作物破土时需预留出苗孔, 覆膜灌溉时还需考虑增设灌水孔, 对这些田间存在的不同类型孔的问题, 可采用覆膜开孔率这一指标来统一表征。土面蒸发是造成土壤水分损失、导致干旱的一个重要因素, 蒸发中温度梯度的存在将使剖面水分分布发生相应变化。在覆膜开孔蒸发过程中, 由于土表采用打孔的膜进行覆盖后, 改变了未覆盖时土壤—大气之间物质交换的连续性, 因此对于蒸发条件(外界大气蒸发能力、土壤等)一致而覆盖条件不同的土壤, 表土覆膜开孔率成为蒸发过程中水热运移的控制性上边界条件, 因而直接影响蒸发的水分效率。

国内外学者就土壤蒸发过程及其数学模拟已进行了大量研究。但以往的研究侧重于裸土蒸发<sup>[1~9]</sup>、全覆膜蒸发<sup>[10~12]</sup>、特定覆盖条件下的蒸

发<sup>[13]</sup>或潜水蒸发<sup>[14,15]</sup>, 未涉及 0~100% 的全范围地表覆膜开孔率对蒸发过程中水热运移的影响, 因此无法定量确定覆膜开孔率影响土壤蒸发的特性。本文针对目前国内外很少涉及的覆膜开孔蒸发问题, 分析覆膜开孔率对蒸发过程和蒸发结束时土壤水分和温度的影响, 在实验基础上进行覆膜开孔蒸发的定量分析, 以期为进一步研究覆膜灌溉及灌后蒸发的水热运动提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验系统

为实现蒸发加热过程中土壤温度和含水率的动态测量, 利用垂直一维蒸发实验系统进行土壤初始含水量均匀的覆膜开孔蒸发实验, 实验装置如图 1 所示。图 1 中的蒸发实验系统主要包括实验土柱、水分测量系统、温度测量系统以及加热系统。

实验土柱长 60 cm, 为防止土柱边壁与外界环

\* 国家杰出青年科学基金(40025106)、中国博士后科学基金、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501)

作者简介: 李 毅(1974~), 女, 汉族, 博士后, 主要从事土壤水、盐、热耦合运移方面的研究。E-mail: liyimm@163.net

收稿日期: 2003-03-11; 收到修改稿日期: 2003-08-02

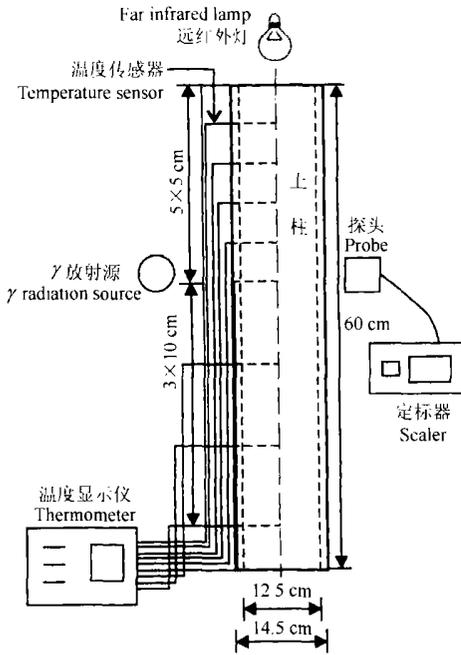


图1 覆膜开孔蒸发实验系统立面图

Fig 1 Experimental apparatus for evaporation from soil covered with perforated plastic mulch

境之间的热交换,土柱由可保温绝热的双层有机玻璃材料制成。土柱内截面积为 $10.0\text{ cm} \times 12.5\text{ cm}$ ,内外层间距为 $1.0\text{ cm}$ 。土柱边壁设间隔固定的一排孔,可用于土柱纵向中心轴线处埋设温度传感器。自上端 $0\sim 25\text{ cm}$ 的埋设孔深度间隔为 $5\text{ cm}$ , $25\text{ cm}$ 以下间隔 $10\text{ cm}$ 。水分动态测量系统包括 $\gamma$ 放射源,探头及定标器,可完成实验过程中土壤水分的动态定位测定;温度测量系统包括Cu50型温度传感器和温度显示仪两部分,用于土壤温度的动态定位测定,其中,温度传感器测量精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。加热系统采用 $250\text{ W}$ 远红外灯,蒸发过程中供热源与表土间距为 $22\text{ cm}$ 并维持不变。

## 1.2 实验土样的基本性质

实验土样取自新疆石河子兵团盐碱地灰漠土。土样取回后,经碾压、粉碎、风干、过筛后测定其基本物理化学特性。采用烘干法测定土壤风干含水率,用环刀装土饱和后烘干测定饱和含水率;对大于 $0.1\text{ mm}$ 的土粒采用筛分法,而小于 $0.1\text{ mm}$ 的土粒采用精度较高的吸管法测定了土壤的粒径分配;用南-55型渗透仪测定了饱和导水率。测定结果为:土壤风干含水率与饱和含水率分别为 $0.035$ 和 $0.48\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$ ;饱和导水率为 $0.002\text{ cm min}^{-1}$ ;土样的粘粒、粉粒和砂粒含量分别为 $113$ 、 $543$ 和

$344\text{ g kg}^{-1}$ ,参照我国质地分类系统该土样属于粉质壤土。

## 1.3 实验方法

实验土样经风干、粉碎、过筛后,配置成 $0.234\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$ 的初始含水量,混合均匀后,按 $1.45\text{ g cm}^{-3}$ 的设计容重分层均匀装入双层有机玻璃土柱。本文的覆膜开孔率为覆膜开孔总面积与表土横截面积之比。为对比不同覆膜开孔率条件下、剖面初始含水率分布均匀的土壤蒸发状况,以揭示不同覆膜开孔率条件下土壤水分和温度特征,实验中同时用6个土柱进行覆膜开孔蒸发实验。实验选取的表土覆膜开孔率分别为 $0\%$ 、 $1.39\%$ 、 $2.84\%$ 、 $7.24\%$ 、 $30.5\%$ 和 $100\%$ ,其中 $1.39\%$ 、 $2.84\%$ 、 $7.24\%$ 、 $30.5\%$ 的开孔率对应的单孔直径分别为 $1$ 、 $2$ 、 $2.8$ 及 $5\text{ mm}$ ,膜孔呈梅花状等间距交错分布。 $0\%$ 的开孔率代表全膜覆盖;而 $100\%$ 的开孔率为不覆膜。蒸发过程中,每隔特定时间用 $\gamma$ 透射法观测土壤水分动态,同时用温度传感器测定剖面土温。蒸发总历时均为 $10\text{ d}$ 整。实验完毕后立即在土柱不同深度取样,烘干测定土壤含水率。经各蒸发处理的含水量烘干测定结果与 $\gamma$ 透射法测定结果进行对比,表明 $\gamma$ 透射法测量精度可达 $98\%$ 。此外,实验中采用与土柱截面积相同的蒸发皿( $10\text{ cm} \times 12.5\text{ cm}$ )同时进行水面蒸发测定,以确定外界大气蒸发能力。实测水面蒸发强度为 $0.025\text{ cm min}^{-1}$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 覆膜开孔蒸发的温度变化

由于蒸发加热过程中土体受热后吸收热量,因此土体温度随蒸发时间的延长而升高,而且其升温规律与深度有关,表层土温升高最快而底端最慢。根据实测资料分析,对于相同的供热强度,地表覆膜开孔率不同的土体温度场有所不同,总体上全覆膜蒸发结束的剖面温度比其他开孔率不同的剖面温度稍高。

**2.1.1 温度的瞬态变化规律** 不同覆膜条件下土壤升温的剖面变化趋势基本类似,现以开孔率为 $100\%$ 的裸土蒸发为例说明。图2为裸土蒸发不同时刻的剖面土温分布,初始温度为 $26.0^\circ\text{C}$ 。

由图2可知:(1)在持续加热过程中,任一时刻剖面温度均在表层 $0\text{ cm}$ 最高,而底土温度最低;随深度增加温度逐渐降低,剖面土温由上至下呈非线性降低趋势且增加较快,蒸发 $1774\text{ min}$ ( $29.57\text{ h}$ )

时, 表层 0 cm 温度已至 48.7℃, 比初始时升温达 22.7℃。(2) 随深度增加剖面温差梯度逐渐减小, 其中上层 25 cm 范围尤其是表层温差梯度较大, 该深

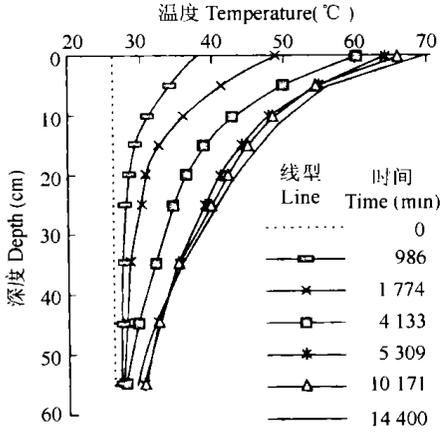


图 2 裸土蒸发的温度剖面

Fig. 2 Temperature profiles of bare soil during evaporation

度以下温差梯度比 25 cm 以上温差梯度小得多。(3) 不同时刻的温度分布都表明, 25 cm 以下土温增幅相对于 25 cm 以上都不大, 因此可认为 25 cm 是温度影响蒸发的临界点, 可将 25 cm 定义为温度变化的影响深度。(4) 根据实测资料分析可得土温  $T$  与深度  $z$  之间的函数关系表示为:

$$T = A_T e^{B_T z} \quad (1)$$

式中,  $A_T$ 、 $B_T$  为拟合参数, 其中  $A_T$  为土表 0 cm 温度;  $A_T$  为正,  $B_T$  为负值。不同时刻拟合相关系数均大于 0.963。上式对  $z$  求导, 可得温度梯度与土层深度的函数关系:

$$\text{Grad}(T) = A_T B_T e^{B_T z} \quad (2)$$

式中,  $\text{Grad}(T)$  为温度势梯度 ( $^\circ\text{C cm}^{-1}$ )。实测不覆膜蒸发的表土 0 cm 温度梯度最大, 达  $2.14 \text{ }^\circ\text{C cm}^{-1}$ , 随深度增加温度梯度快速降低, 25 cm 以下温度梯度比该位置以上小且小于  $0.5 \text{ }^\circ\text{C cm}^{-1}$ 。其温度梯度与位置的指数关系为:

$$\text{Grad}(T) = -1.623e^{-0.063z}, R^2 = 0.972 (n = 8) \quad (3)$$

**2.1.2 覆膜开孔率对剖面温度的影响** 经过一定历时后, 不同覆膜开孔率条件下蒸发的剖面温度基本不再随时间增加而变化。不同覆膜开孔率条件下蒸发结束的剖面温度分布趋势基本类似。为比较其差异, 将实测不同覆膜开孔率条件下实验结束的剖面温度分布做图(图 3)。

由图 3 可见, 覆膜开孔率对蒸发结束的温度剖面有明显影响, 其影响在上层 25 cm 的深度范围内

更显著, 该深度以下温度差异不大。随覆膜开孔率由 0% 增加至 100%, 蒸发结束的剖面温度逐渐降低, 其中全覆膜蒸发和裸土蒸发的表层土温分别为  $57.8 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $63.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 两者相差  $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

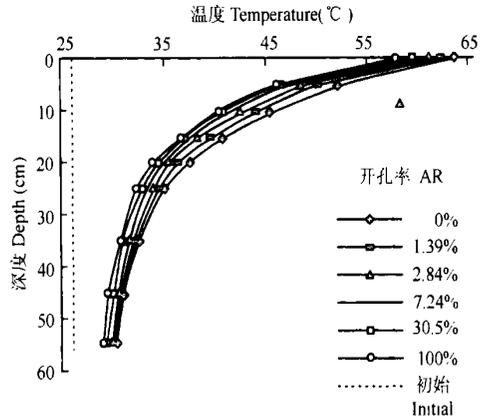


图 3 覆膜蒸发的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of soil under plastic mulch during evaporation

## 2.2 覆膜开孔蒸发的水分运动规律

**2.2.1 覆膜开孔蒸发的蒸发速率及土壤含水率的时间动态** 通常认为, 在大气蒸发能力比较固定的情况下, 湿润土壤开始蒸发时, 土面蒸发可依次分为三个阶段: 稳定速率阶段、速率递减阶段和扩散控制阶段, 三个阶段连续依次发生。由于蒸发导致土体含水率发生变化, 因此当地下水位很深而蒸发不能对其产生影响时, 土壤蓄水将不断减少。在相同的大气蒸发能力和土壤供水条件下, 土壤与大气之间的水分交换直接受上边界覆膜开孔率条件控制, 显然不同覆膜开孔率下的蒸发土壤水分特征存在差异。

根据  $\gamma$  射线测得的剖面土壤含水率随时间变化的累加值, 得到剖面土壤蓄水量随时间变化趋势, 用初始剖面贮水量与其相减, 可得不同时刻的累积蒸发量  $E$ , 不同时刻的累积蒸发量与蒸发时间的比值即为蒸发速率  $e$ 。根据实测资料分析, 不同覆膜开孔率下累积蒸发量均随时间呈非线性变化趋势, 且累积蒸发量随覆膜开孔率的增加而增加; 类似地, 蒸发速率也随时间呈非线性变化趋势。以不覆膜蒸发为例, 实测蒸发速率随时间变化可用幂函数表示:

$$e = 0.075t^{-0.730}, R^2 = 0.856 (n = 22) \quad (4)$$

蒸发过程中, 土壤中逐渐形成了由上至下的温度势梯度, 同时加热之初土壤含水率值较大, 表面温度升高后在土壤—空气界面之间形成了由下至上的水汽压梯度, 由于土壤表面加热的温度较高 ( $> 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 因此水分以水汽形式向大气散失。表层

水分降低进而形成了由下至上的基质势梯度, 导致水分自下而上运动而不断散失。因系统无外来水量补给, 因此剖面土壤含水率随蒸发时间的延长而不断降低。根据实测资料分析, 含水率的这一变化规律随覆膜开孔率的增加而趋于明显, 在不同的覆膜开孔蒸发中, 不覆膜蒸发损失的水量最大。图4显示了不覆膜蒸发的剖面含水率随时间的变化。

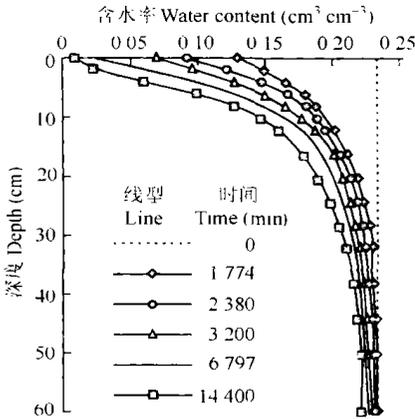


图4 蒸发的含水率剖面变化

Fig 4 Variation of soil water content during evaporation

由图4可见, 蒸发使剖面土壤水分不断减少, 随土层深度增加含水率变化速率相对变缓, 尤以表层0 cm 含水率损失最快, 而土体底部含水率变化很小。经分析, 0 cm 含水率随蒸发时间的变化可用指数关系表示:

$$\theta = 0.145e^{-0.0002t}, R^2 = 0.929 (n = 27) \quad (5)$$

式中  $\theta$  为表层土壤含水率( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $t$  为蒸发时间(min)。

**2.2.2 不同覆膜开孔率影响下蒸发结束的剖面含水率** 在覆膜开孔蒸发过程中, 地表覆膜开孔全部或部分阻隔了土壤—大气体系间水分联系的通道, 因而改变了土壤水分向大气中扩散的速度, 从而影响整个土体的蒸发量。图5显示了土体初始含水率为  $0.234 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 、蒸发结束后(10 d)地表覆膜开孔率分别为 0%、1.39%、2.84%、7.24%、30.5% 及 100% 的土壤剖面含水率分布。

由图5可见:(1)蒸发结束后的剖面水量基本随覆膜开孔率的增大而依次减小, 覆膜开孔率越大, 蒸发损失的水量越多, 而且无论是全覆膜、覆膜开孔还是不覆膜, 整个土壤剖面上含水率均有不同程度的降低。某一覆膜开孔率下的含水率剖面中, 表层0 cm 含水率降低最多。(2)全覆膜蒸发的水分剖面虽然比其它情况水量损失小, 但仍有损失。温度升

高后, 全覆膜土壤剖面中的水分主要以汽态形式向土体外散失, 由此可确定水汽运动在覆膜蒸发中所失水量的最大比例, 实测结果分析表明, 该值为 6.41%。

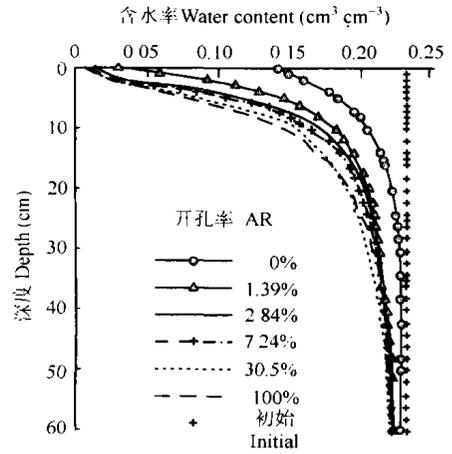


图5 实验结束的含水率分布

Fig 5 Water content distribution at the end of the evaporation test

**2.2.3 累积蒸发量与时间及覆膜开孔率的关系**

Gardner 及其他研究者关于一维裸土蒸发中累积蒸发量随时间变化的理论和实验分析结果表明, 累积蒸发量  $E$  与时间  $t$  的平方根呈线性关系<sup>[1,2]</sup>:

$$E = AEt^{0.5} \quad (6)$$

式中,  $E$  为累积蒸发量(cm);  $AE$  为与土壤性质有关的系数。经实测资料分析, 不仅开孔率为 100% 的裸土蒸发特征符合上述关系, 而且不同覆膜开孔率条件下的累积蒸发量随时间变化趋势也服从该关系。图6显示了不同覆膜开孔率下累积蒸发量随时间平方根变化的趋势。

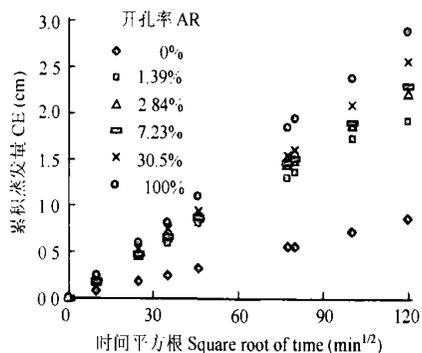


图6 累积蒸发量的时间变化趋势

Fig. 6 Cumulative evaporation variation with time

采用式(6)拟合不同覆膜开孔率条件下的实测

蒸发资料, 所得的蒸发系数  $A_E$  见表 1。

表 1 不同覆膜开孔率下的累积蒸发量系数  $A_E$

Table 1 Cumulative evaporation coefficient  $A_E$  at different aperture ratios

| $u$ (%) | $A_E$  | $R^2$ | $A_E - 0.0075$ |
|---------|--------|-------|----------------|
| 0       | 0.0075 | 0.977 | 0              |
| 1.39    | 0.0182 | 0.991 | 0.0107         |
| 2.84    | 0.0190 | 0.992 | 0.0115         |
| 7.24    | 0.0192 | 0.982 | 0.0117         |
| 30.5    | 0.0214 | 0.979 | 0.0139         |
| 100     | 0.0243 | 0.961 | 0.0168         |

由表 1 可见, 蒸发系数  $A_E$  随开孔率  $u$  的增大而呈非线性趋势增大。若将不同覆膜开孔率下的  $A_E$  与开孔率为 0% 的  $A_E$  (0.0075) 相减, 则得出的值代表了不同覆膜开孔率蒸发的  $A_E$  相对于全覆膜蒸发的增量。分析可知这一增量为覆膜开孔率 ( $u > 0\%$ ) 的幂函数:

$$A_E - 0.0075 = 0.010u^{0.102}, R^2 = 0.951 \quad (7)$$

将上式代入式 (6), 可得由开孔率和时间表示的累积蒸发量的双因素代数模型:

$$E = (0.010u^{0.102} + 0.0075)t^{0.5} \quad (8)$$

因此给定一个开孔率值, 便可得出累积蒸发量随时间变化的趋势。上式将蒸发系数  $A_E$  的物理意义与覆膜开孔率联系起来, 将 Gardner 的裸土蒸发理论关系应用于覆膜开孔蒸发的实例, 不仅在实验基础上扩展了该理论关系, 而且拓宽了 Gardner 理论关系的应用范围。

式 (8) 对时间求导, 可得蒸发速率由覆膜开孔率和时间表示的函数关系:

$$e = (0.005u^{0.102} + 0.004)t^{-0.5} \quad (9)$$

式中  $e$  为蒸发速率 ( $\text{cm min}^{-1}$ );  $u$  为覆膜开孔率 (%)。

### 2.2.4 相对累积蒸发量随覆膜开孔率变化趋势

覆膜开孔率为 100% 的累积蒸发量表征裸土蒸发特征。对于容重、初始含水率及质地不变的土壤, 表面覆膜开孔率不同表明了上边界条件对蒸发的控制作用, 而与土壤本身的性质无关。定义蒸发历时相同、不同覆膜开孔率条件下的累积蒸发量与开孔率为 100% 的累积蒸发量的比值, 称为相对累积蒸发量, 用  $E_{re}$  表示。 $E_{re}$  作为一无量纲变量, 在数值上是某一开孔率下的  $A_E$  值与开孔率为 100% 的  $A_E$  值的比, 与时间无关。 $E_{re}$  与开孔率之间的定量关系表明不同覆膜开孔率下蒸发的累积蒸发量相对于裸土蒸

发的比例。表 2 列出了根据实测资料计算的  $E_{re}$ 。

表 2 覆膜开孔率影响下的相对累积蒸发量

Table 2 Relative cumulative evaporation affected by aperture ratio

| $U$ (%) | $E_{re} (= A_E/A_{E,100})$ |
|---------|----------------------------|
| 0       | 0.3086                     |
| 1.39    | 0.7490                     |
| 2.84    | 0.7819                     |
| 7.24    | 0.7901                     |
| 30.5    | 0.8807                     |
| 100     | 1.0                        |

将不同覆膜开孔率的  $E_{re}$  与 0% 的  $E_{re}$  相减后进行分析, 可得  $E_{re}$  与覆膜开孔率之间的函数关系:

$$E_{re} - E_{re,0} = E/A_{E,100} - 0.3086 = 0.416u^{0.102} + 0.309, R^2 = 0.951 \quad (10)$$

则  $A_E = (0.416u^{0.102} + 0.309)A_{E,100}$  (11)

因此不同覆膜开孔条件下蒸发的累积蒸发量可用相应的蒸发系数与时间关系确定, 表示为:

$$E = (0.416u^{0.102} + 0.309)A_{E,100}t^{0.5} \quad (12)$$

根据上述关系可以通过不覆膜蒸发的规律确定覆膜开孔后的累积蒸发量变化规律。

### 2.2.5 单位膜孔面积的累积蒸发量随覆膜开孔率变化趋势

实测资料分析表明, 不同覆膜开孔率条件下, 蒸发结束的总累积蒸发量随覆膜开孔率的增大而逐渐增加。为进一步探讨覆膜开孔条件下的蒸发特征, 在此定义总累积蒸发量与覆膜开孔总面积的比值为单位膜孔面积的累积蒸发量, 用  $E_R$  表示。根据实测资料计算结果, 将  $E_R$  随  $u$  变化的趋势显示于图 7。

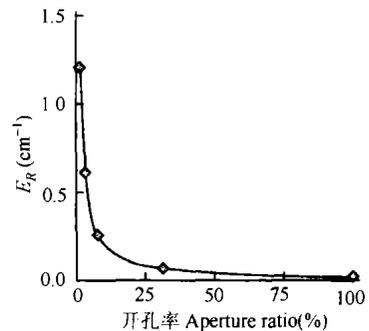


图 7  $E_R$  随覆膜开孔率变化趋势

Fig 7  $E_R$  variation with aperture ratio

由图 7 可知: (1)  $E_R$  随覆膜开孔率的增加而减小, 表明在相同蒸发时间内, 单位膜孔面积上蒸发的水量随覆膜开孔率的增大而减小。(2) 当覆膜开孔

率在 0~ 2.84% 变化时,  $E_R$  的减少趋势更明显。

虽然覆膜开孔率不同, 但由于覆膜开孔改变了原本覆膜未开孔的上边界, 将原先全覆膜阻断大气—土壤之间水分连续性的性能改变了, 因此在温度势梯度存在的前提下, 土壤水通过或大或小的膜孔向大气中散失。覆膜开孔实际上提供了土壤和大气之间水分联结的通道, 而且这一通道与膜孔的面积密切相关。由于累积蒸发量随开孔率的增大而逐渐增加, 因此覆膜开孔抑制蒸发的效率随覆膜开孔率的增大而减小。

分析表明,  $E_R$  与覆膜开孔率有极好的幂函数关系, 表示为:

$$E_R = 1.615u^{-0.925}, R^2 = 0.999 \quad (13)$$

### 3 结 论

1) 采用垂直一维蒸发实验系统进行土壤初始含水量均匀的覆膜开孔蒸发实验, 可实现对不同地表覆膜开孔的控制条件下, 蒸发过程中土壤含水率和温度的动态变化规律的认识。

2) 分析了地表覆膜开孔率不同时, 蒸发的剖面温度动态变化及蒸发结束的温度分布特征。土温和土体温度梯度均可表示为深度的指数函数形式。不同覆膜开孔率蒸发结束的温度剖面比较分析表明, 覆膜表土温度可比不覆膜的提高 5.5℃。

3) 蒸发速率随时间变化趋势可用幂函数形式。剖面含水率随时间延长而呈降低趋势, 且表层 0 cm 土壤含水率随蒸发时间的变化可用指数关系表达。

4) 不同覆膜开孔率的控制条件下蒸发的累积蒸发量均与时间平方根呈线性关系, 这一结论符合 Gardner 关于一维裸土蒸发的理论关系; 进一步分析可建立覆膜开孔率和时间表示的累积蒸发量模型, 从而将 Gardner 的蒸发理论应用于覆膜开孔蒸发, 在实验研究基础上发展了其理论关系, 拓展了该关系的应用途径。此外, 相对累积蒸发量和单位膜孔面积的累积蒸发量均与覆膜开孔率存在定量关系。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Gardner W R. Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1959, 23: 183~ 187
- [ 2 ] Gardner H R, Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1969, 33: 192~ 196
- [ 3 ] Badmann J, Horton R, van der Ploeg R R. Isothermal and non-isothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1 599~ 1 607
- [ 4 ] Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil. *Water Resour. Res.*, 1984, 20: 1 087~ 1 098
- [ 5 ] Lascano R J, van Bavel C H M. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50: 1 127~ 1 133
- [ 6 ] Philip J R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *Journal of Meteorology*, 1957, 14: 354~ 366
- [ 7 ] 谢森传. 农田水分循环中的蒸发蒸腾计算. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 107~ 110. Xie S C. Estimation of evaporation and transpiration of farmland water cycling (In Chinese). *Journal of Tsinghua University (Sci & Tec)*, 1998, 38(1): 107~ 110
- [ 8 ] 杨邦杰, Blackbell P S, Nicholson D F. 土壤表面蒸发阻力模型与田间测定方法. 地理学报, 1997, 52(2): 177~ 183. Yang B J, Blackbell P S, Nicholson D F. Soil surface resistance models to evaporation and field measurements (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 177~ 183
- [ 9 ] 刘钰, Fernando R M, Peira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究. 水利学报, 1999, 6: 45~ 50. Liu Y, Fernando R M, Peira L S. Measurement of evaporation from wheat field and bare soil by using micro-lysimeters (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 6: 45~ 50
- [ 10 ] Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 362~ 367
- [ 11 ] 王康, 黄介生. 塑料薄膜覆盖时土壤内水热传输模拟. 灌溉排水, 1999, 18(1): 32~ 38. Wang K, Huang J S. Simulation of water and heat transfer in soil mulched with transparent plastic film (In Chinese). *Irrigation and Drainage*, 1999, 18(1): 32~ 38
- [ 12 ] 吴从林, 黄介生, 沈荣开. 地膜覆盖条件下 SPAC 系统水热耦合运移模型的研究. 水利学报, 2000, 11: 89~ 96. Wu C L, Huang J S, Shen R K. A model of heat and water flow in SPAC under transparent polyethylene mulch (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 11: 89~ 96
- [ 13 ] Chung S O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.*, 1987, 23 (12): 2 175~ 2 186
- [ 14 ] 刘福汉, 王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动. 土壤学报, 1993, 30(2): 173~ 181. Liu F H, Wang Z Q. Soil water and soil salt movement in soil profiles of different soil textures under groundwater evaporation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(2): 173~ 181
- [ 15 ] 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系. 土壤学报, 2002, 39(3): 384~ 389. Liu G M, Yang J S, Li D S. Groundwater evaporation regularity and its relationship with soil salt (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 384~ 389

## DYNAMIC VARIATIONS OF SOIL WATER AND HEAT UNDER EVAPORATION CONDITIONS VARYING WITH APERTURE RATIO OF PLASTIC MULCH

Li Yi<sup>1,2</sup> Shao Mingan<sup>1,2</sup> Wang Wenyang<sup>3</sup> Wang Quanjiu<sup>1,3</sup>

(1 *Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

(2 *Institute of Water and Soil Conservation, CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(3 *Institute of Water Resources in Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

**Abstract** The soil cannot be totally covered by plastic mulch in the field. And normally in the mulch holes should be pre-set for plants to emerge after sowing, and irrigation holes added for irrigation. The term of aperture ratio is often used to represent the above issue. So far very few national or international papers about evaporation from soil under perforated plastic mulch have been reported. In order to study characteristics of evaporation from the soil with initial homogeneous soil water content, a laboratory system of evaporation has been set up. Based on the dynamic observations of soil water and soil temperature, their variation regularities during evaporation and at the end of the evaporation were described, and calculations and analyses of soil temperature variation and soil water content distribution, functions of cumulative evaporation, relatively evaporation and cumulative evaporation per unit area of the film holes to aperture ratios performed. The results showed that under the influence of evaporation, the cumulative evaporation varied linearly with the square of the evaporation time, which corresponded to the bare soil evaporation theory presented by Gardner. These results have extended Gardner equation and expanded its application ranges, thus being very useful for further study on water and heat transport in plastic mulched field.

**Key words** Aperture ratio; Cumulative evaporation; Coupled transport of soil water and soil heat