

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.06.023

覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移

李毅^{1,2}, 任鑫^{1,3}, 司炳成⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 南阳市审计局, 河南 南阳 473000; 4. 萨斯喀彻温大学土壤科学系, 加拿大 萨斯卡通市, SKS7N 5A8)

摘要: 为揭示覆膜开孔条件下不同质地层状土蒸发特性, 选择 0~100% 范围内的 6 种覆膜开孔率、夹垆和夹砂 2 种层状土及 3 个夹层位置, 进行室内土柱蒸发试验, 测定了蒸发量随时间变化规律, 以及土壤水分和温度分布规律。结果表明: 覆膜开孔率和夹层位置的变化都影响层状土壤的温度分布, 3 个层位下全覆膜与裸土蒸发表层温差分别为 3.6、6.6 和 21.8 °C, 层位越深, 剖面温差越大。覆膜开孔率越大, 剖面土温整体越低, 蒸发水量损失越大; 夹层位置越深, 累积蒸发量随时间变化曲线整体越高。幂函数和对数模型描述垆夹砂及砂夹垆的累积蒸发量与时间关系较好。总体上, 覆膜开孔率和夹层位置都影响蒸发过程中的水热运移规律。

关键词: 夹层土壤; 覆膜开孔率; 入渗; 蒸发; 土壤温度

中图分类号: S277.9; S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2012)06-0738-07

Water and heat movement in layered soils during evaporation under perforated plastic mulch

Li Yi^{1,2}, Ren Xin^{1,3}, Si Bingcheng⁴

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Accounts Bureau of Nanyang, Nanyang, Henan 473000; 4. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon SKS7N 5A8, Canada)

Abstract: In order to reveal the evaporation characteristics of different textures of layered soils, two types of layered soils such as Lou soil and sandy soil, were selected to do column evaporation experiment in laboratory at three layer positions under the perforated plastic mulch conditions of 6 percentages of open area (0-100%). During the experiment the soil moisture and temperature distributions were measured, the evaporation was recorded against time as well. The results showed that soil temperature distribution is dependent of open-hole-ratio and layer position; the temperatures on the soil surface under the condition with mulch fully covered at three positions are higher than the bare soil by 3.6, 6.6 and 21.8°C, respectively. The deeper the layer position, the more the difference of soil temperature between the soil surface and the deepest layer position. Such a difference is reduced for a larger open-hole-ratio of mulch. A larger open-hole-ratio results to a higher evaporation and the deeper the layer position, the higher the curve of cumulative evaporation against time. Power and logarithmic function can better describe the relationship between cumulative evaporation and time for both sparse and sandy soils. Generally, both open-hole-ratio of mulch and layer position affect water and heat movement in soil.

Key words: layered soil; open-hole-ratio; infiltration; evaporation; soil temperature

收稿日期: 2012-05-31

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B02); 教育部、国家外国专家局“111”计划项目(B12007)

作者简介: 李毅(1974—), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士(liyikitty@126.com), 主要从事农业水土资源利用研究。

任鑫(1986—), 女, 河南南阳人, 硕士(renxin1986@126.com), 主要从事农业水土资源与保护研究。

覆膜种植技术能提高地温、保持土壤墒情,有效提高水分利用率,调节地面吸热和水分蒸发,改善土壤水肥气热条件,为作物提供很好的生长环境,在北方旱区大田和温室中应用较多. 塑膜覆盖对于土壤水、热、 CO_2 及作物产量等方面有显著影响^[1-4]. 然而,由于田间地膜覆盖率不能达到100%、种植需有破苗孔、灌水需人为开孔等因素,田间实际为非全覆膜情况^[5],使得研究覆膜时开孔率的问题不可避免. 为体现其代表性,需要对开孔程度以统一指标“覆膜开孔率”进行概化,不同覆膜开孔率下土壤水热运移有一定差异. 均质土覆膜开孔条件下的水、盐、热运移已有初步研究^[6-8],但田间土壤普遍存在质地不均一情况,易形成层状结构. 因此对覆膜开孔率影响水热运移过程的研究极为必要.

目前关于覆膜开孔率变化情况下层状土水热运移的研究较少. 文中采用覆膜开孔率来综合代表田间覆膜开孔因素,以2种土壤类型、3个层位、6种

覆膜开孔率等为组合条件,进行室内蒸发试验.

1 材料与方法

供试土样为壤土和砂土,分别取自陕西杨凌和渭河边农田的表层0~30 cm. 土样取回后经风干、碾压、粉碎后过2 mm筛,用烘干法测定风干含水率,可知壤土为2.54%,砂土为0.35%. 用吸管法测得壤土和砂土的黏、粉、砂粒质量分数分别为14.85%, 78.69%, 6.46%和0.06%, 6.23%, 93.71%.

试验装置包括土柱、加热系统和测温系统,见图1. 为减少土壤与外界环境的热交换,土柱用高 h 为50 cm,内径8.5 cm的双层有机玻璃制成. 沿土柱垂向5,10,15,25,35,45 cm设小孔,用于埋设热电偶探头. 用250 W远红外灯加热,蒸发过程中灯距土面25 cm. 测温系统由电源、主板、扩展板、热电偶探头和计算机组成,精度 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$. 室温维持在 $20 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$.

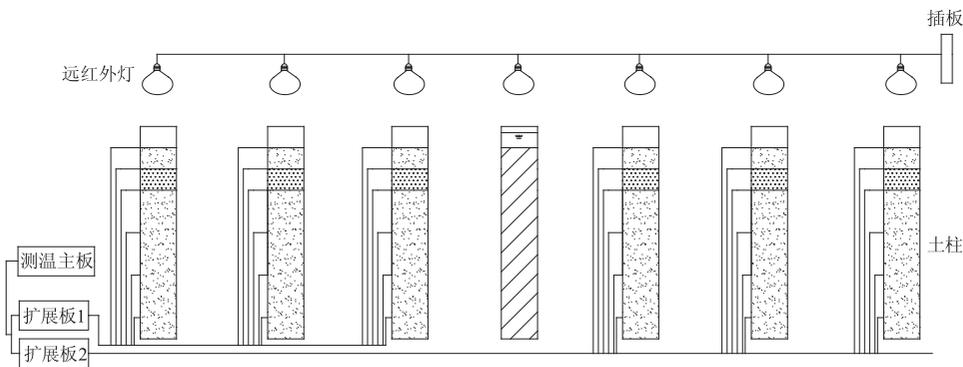


图1 蒸发装置示意图

Fig. 1 Sketch of equipment for evaporation experiment

用壤夹砂和砂夹壤2种层状土进行试验. 壤土和砂土容重分别为 $1.35, 1.65\text{ g/cm}^3$,层位分别为 $5\text{ cm} < h \leq 10\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm} < h \leq 15\text{ cm}$ 和 $20\text{ cm} < h \leq 25\text{ cm}$,层厚5 cm. 将土样分层均匀装入土柱,装土高度45 cm. 蒸发前用马氏瓶对7个土柱同时供水,进行积水高度为2 cm的入渗试验. 综合考虑后,选择35 cm代表平均状况,当湿润锋达35 cm时停止入渗,之后即在1个土柱不同深度取土测定.

入渗结束即在5个土柱表面覆盖开孔率分别为0(全覆膜),0.69%,2.78%,7.71%,18.7%的透明塑料膜,另1个土柱开孔率为100%(不覆膜). 打开远红外灯,6个土柱同时开始蒸发试验. 每天在固定时刻对土柱称重,同时由温度传感器自动测定土

温. 蒸发历时10 d整. 蒸发结束后即在土柱不同深度处取土,用烘干法测定含水率.

2 结果与讨论

2.1 覆膜开孔蒸发的温度变化

2.1.1 覆膜开孔条件下土温分布特征

覆膜开孔影响了土壤水分分布,外界环境条件变化不大时,加热后土面开始增温,在历时不长的瞬态变化之后,不同位置的温度进入稳态过程. 30 cm以下深度温度梯度很小. 为比较不同覆膜开孔率 u 对蒸发8 d后土温的影响,将实测30 cm以上的剖面温度分布绘图,如图2所示,其中 Z 为深度, θ 为土壤温度.

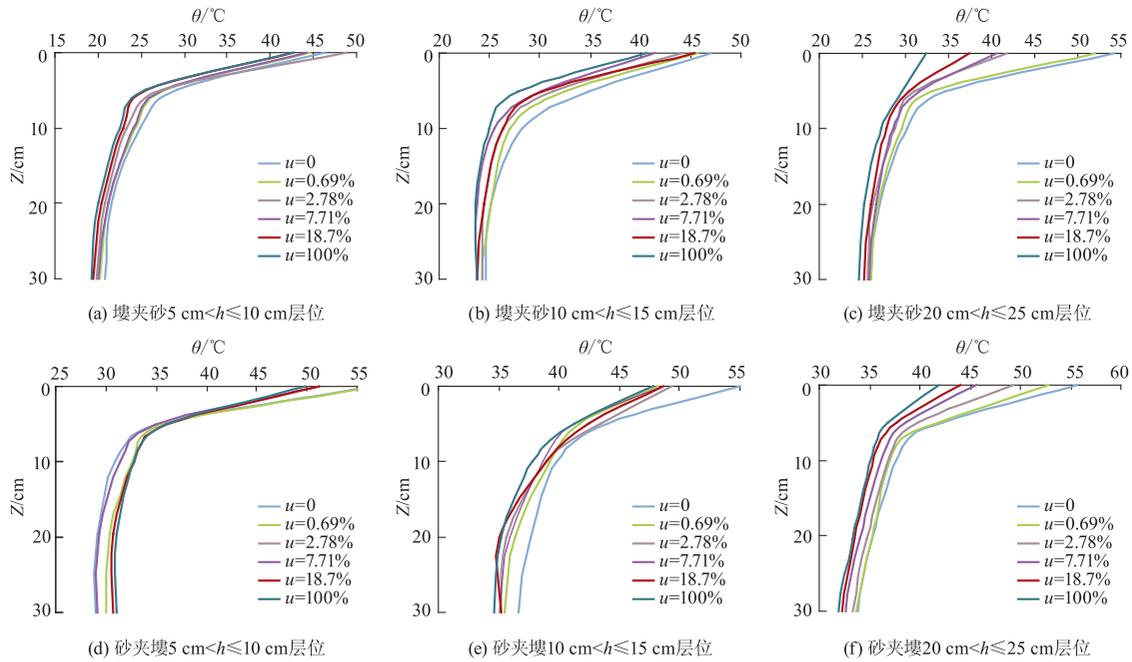


图2 覆膜开孔条件下层状土蒸发的温度剖面

Fig. 2 Temperature profile for layered soil under perforated-plastic mulch

由图2可见:①不同开孔率条件下,土温均随深度加深而降低,表层降温幅度最大,10 cm以上土温降幅更明显.表土温度波动范围40~55℃.②同样的覆膜开孔率和同层位条件下,砂夹垵的剖面土温明显高于垵夹砂的土温.③全覆膜(100%)的土温最高,覆膜开孔率越小,增温效果越好,说明覆膜具有增温作用.④不同覆膜开孔率条件下,夹层位置为20 cm < h ≤ 25 cm的剖面土温与夹层位置为5 cm < h ≤ 10 cm和10 cm < h ≤ 15 cm的相比,差异较大.这说明,当夹层位置靠近表层时,质地对土温的影响比覆膜开孔率更明显.当夹层位置靠近表层时,一旦土表

覆膜开孔,膜的增温作用就不再显著了.当夹层位置下移,质地对温度的影响逐渐弱于覆膜开孔率的影响.⑤就表土温度而言,5 cm < h ≤ 10 cm,10 cm < h ≤ 15 cm和20 cm < h ≤ 25 cm层位垵夹砂的全覆膜与裸土蒸发表层温差分别为3.6,6.6和21.8℃,相应各层位下砂夹垵全覆膜与裸土蒸发的表层温差分别为6.9,7.2和13.5℃.夹层位置越深,表层温差越大.

2.1.2 夹层对全覆膜温度分布的影响

为详细对比不同夹层位置对土温的影响,将全覆膜、蒸发历时为8 d、稳态温度剖面形成后,不同夹层位置条件下的土壤剖面温度分布绘于图3.

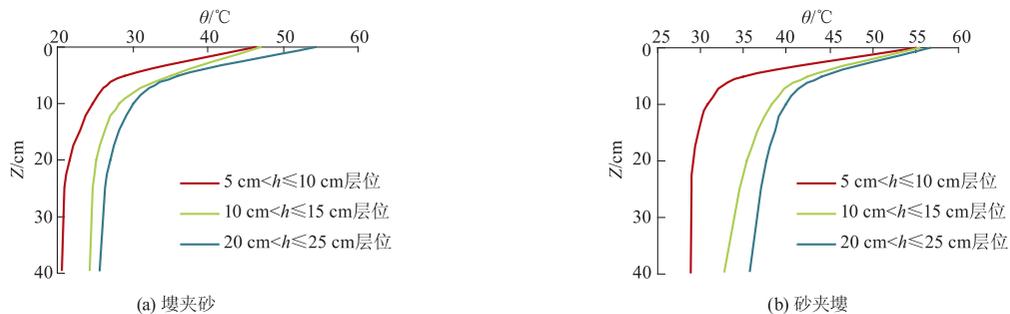


图3 不同夹层位置条件下全覆膜土壤温度剖面

Fig. 3 Soil temperature profile at different layer positions under fully covered mulch condition

由图3可知:①任意层位下,随深度增加土温为非线性递减.层位下移时,砂夹垵0 cm土温的差异不大.②表层5 cm以内土温沿深度改变幅度最为明显,其温度变化大于5~40 cm深度的,温度梯度大.③夹层层位对不同深度土温的影响较明显.垵夹砂

土壤中,夹层位置为5 cm < h ≤ 10 cm的0 cm和40 cm温差为24.1℃,而夹层位置为10 cm < h ≤ 15 cm和20 cm < h ≤ 25 cm时,此两深度温差分别为19.4,19.0℃,前者比后者分别高4.7,5.1℃.砂夹垵土壤中,夹层位置为5 cm < h ≤ 10 cm的0 cm和

40 cm 温差达 25.9 °C, 同样比夹层层位为 10 cm < h ≤ 15 cm (18.5 °C) 和 20 cm < h ≤ 25 cm 时的 (18.4 °C) 高. ④ 同一层位下, 砂夹垭的温度剖面整体比垭夹砂的高, 差异为 2 ~ 8 °C.

2.2 覆膜开孔蒸发的水分运动

2.2.1 蒸发结束后的水分分布规律

图 4 显示了 2 种土壤、3 种层位、6 个开孔率、蒸发 10 d 的质量含水率 (ω) 分布.

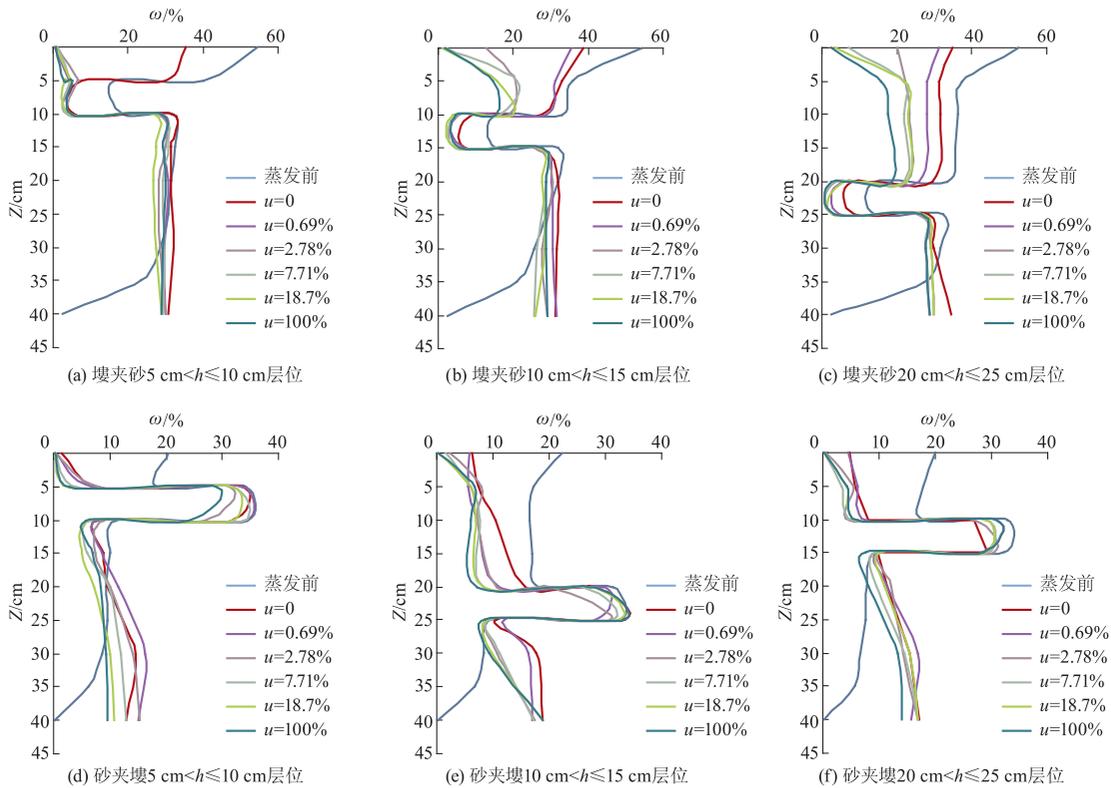


图 4 不同覆膜开孔率条件下层状土剖面土壤水分分布
Fig. 4 Soil moisture profile for layered soil at different percentage of open area

由图 4a - c 可知, 垭夹砂情况下: ① 夹砂层以上的土壤含水率分布同时受夹层位置和覆膜开孔率的影响. 砂层位置越深, 上层土壤的含水率差异越大. 层位为 5 cm < h ≤ 10 cm 时, 仅开孔率为 0 (全覆膜) 的 5 cm 以内深度土体含水率在 30% 以上, 其余开孔率下表层含水率均接近为 0; 砂层位置为 10 cm < h ≤ 15 cm 时, 开孔率为 0 和 0.69% 的土体 0 < h ≤ 5 cm 深度含水率在 30% 以上, 而开孔率大于 2.78% 时, 土体 0 < h ≤ 5 cm 含水率均接近为 0; 砂层位置为 20 cm < h ≤ 25 cm 时, 不同开孔率的含水率差异较大, 开孔率越小, 砂层以上的含水率越高. 当夹层位置较浅时, 含水率受开孔率的影响次于土壤质地的影响; 而当砂层位置逐渐下移时, 与砂层位置和质地相比, 开孔率成为含水率分布的主控因素. ② 砂层以下的含水率基本围绕一垂线摆动, 说明下层水分同时进行了再分布. 夹砂层以下水分损失很小且在各深度分布均匀, 各开孔率条件下含水率均在 30% 附近, 开孔率对夹层以下的水分影响不

大. ③ 夹砂层含水率均小于蒸发前, 3 种层位下砂层水量均有损失. 当砂层位置逐渐下移时, 砂层含水率变化随开孔率的增大逐渐增大, 但总体上比入渗结束时小.

由图 4d - f 可知, 砂夹垭情况下: ① 垭土夹层以上范围的土壤含水率分布同时受层位和开孔率的影响. 当层位逐渐下移时, 开孔率的影响逐渐大于夹层的影响. ② 夹层以上含水率随深度加深而增大, 但均在 0.1 以下, 夹层位置为 5 cm < h ≤ 10 cm 时, 各开孔率下土表含水率均接近 0. 夹层埋深在 10 cm < h ≤ 15 cm 和 20 cm < h ≤ 25 cm 时, 除开孔率为 0 和 0.69% 外, 其他开孔率的土表含水率均接近为 0. ③ 夹层以下含水率随深度加深而略有增大, 与蒸发前趋势相反. 夹层位置为 10 cm < h ≤ 15 cm 和 20 cm < h ≤ 25 cm 时, 夹黏层以下含水率均大于蒸发前, 此时夹层以下深度土壤水的蒸发作用弱于再分布作用, 夹层抑制了下层水分的上行. ④ 夹层含水率均小于蒸发前, 说明 3 个层位下的夹层水分均有损失, 但和垭夹砂的情

况相比,水分损失量较小.

2.2.2 夹层位置对累积蒸发量的影响

基于实测资料,点绘壤夹砂和砂夹壤条件下裸土累积蒸发量 E 随时间 t 的变化,如图5所示.

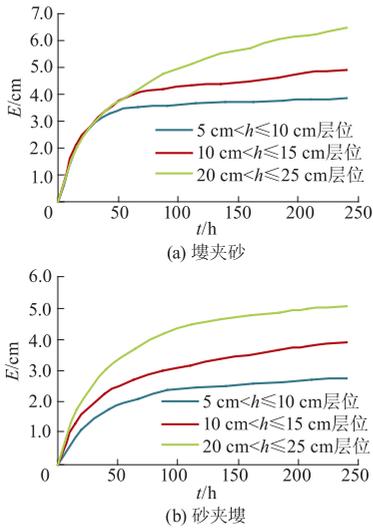


图5 不同夹层位置的裸土累积蒸发量随时间变化

Fig. 5 Cumulative evaporation against time at different layer positions for bare soil

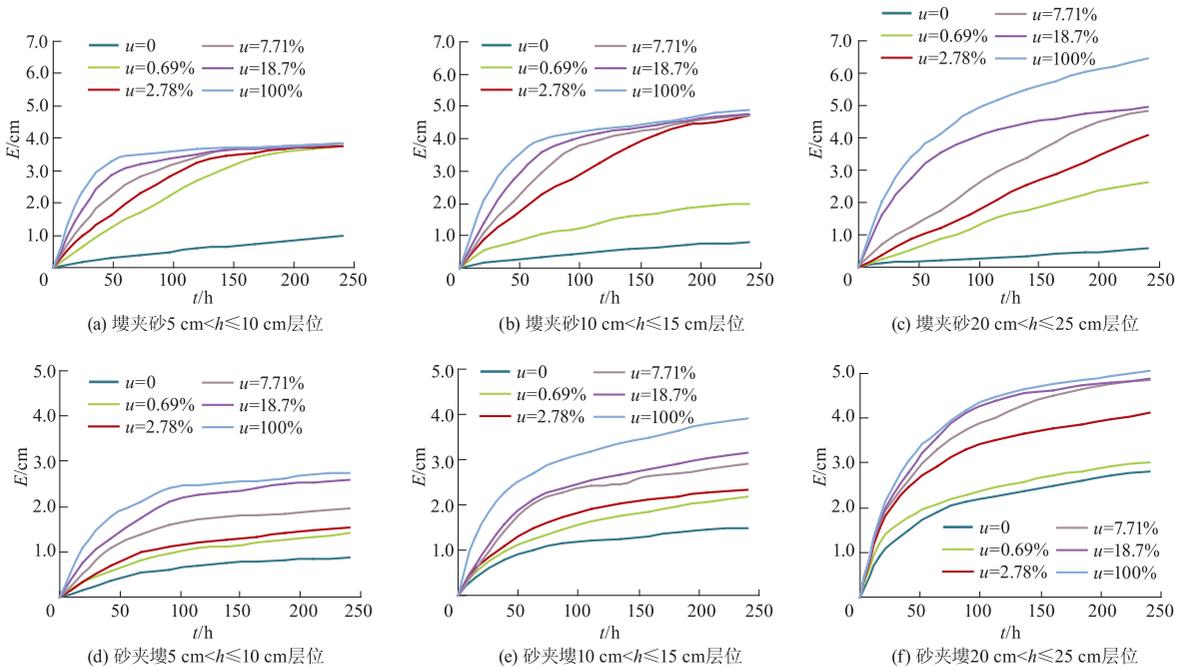


图6 不同覆膜开孔条件下层状土的累积蒸发量随时间变化关系

Fig. 6 Cumulative evaporation against time at different percentages of open area for layered soil

由图6可知:① 壤夹砂情况,层位不变时, $E-t$ 曲线随覆膜开孔率增大而增大,全覆膜的 $E-t$ 变化更接近线性关系. 砂夹壤的 $E-t$ 曲线具有类似变化规律,但 $E-t$ 变化均呈非线性关系. ② 壤夹砂情况下,当夹层深度下移时,同一开孔率下 $E-t$

由图5可知:① 壤夹砂情况下,前40 h时3个层位的 $E-t$ 变化曲线基本重合.40 h前蒸发水量来源于表土5 cm 壤土层,下层水分运动尚未影响到整体水分损失量.40 h后不同层位蒸发量随时间的延长而明显不同. ② 砂夹壤情况下,从蒸发初始3个不同层位下 E 有明显差异, $E-t$ 都为非线性. ③ 其他条件不变时,层位越深, E 越大. 夹层对下层水分有阻碍作用,夹层越浅,阻碍作用越明显.

根据全部实测资料,不同覆膜开孔率条件下壤夹砂蒸发量时间变化过程与层位的关系并不完全与裸土蒸发变化规律一致. 全覆膜的壤夹砂总蒸发量随夹层层位的下移而减小(0.97 ~ 0.58 cm),但其值均较小. 当覆膜开孔率逐渐增大时,壤夹砂蒸发量随层位的下移呈现低—高一低或高一低—高的过渡性规律,直到覆膜开孔率不小于7.71%时,蒸发量随层位下移的规律才表现出一致性.

不同覆膜开孔率下,砂夹壤蒸发量均随下移而增大,且比同条件下壤夹砂总蒸发量大.

2.2.3 覆膜开孔率对累积蒸发量的影响

不同覆膜开孔率下层状土的 $E-t$ 变化,见图6.

曲线整体抬高. 砂夹壤的 $E-t$ 曲线具有类似的变化规律. ③ 相同层位和开孔率条件下,壤夹砂的蒸发量大于砂夹壤情况. ④ 10 d 总蒸发量变化较大. 砂夹壤5 cm < h <= 10 cm 层位全覆膜

的总蒸发量为 0.58 cm, 而壤夹砂 20 cm < h ≤ 25 cm 层位裸土总蒸发量为 6.45 cm, 分别居最小和最大.

2.2.4 累积蒸发量的时间变化

对壤夹砂的实测 E-t 关系可用线性关系和幂

函数描述, 但幂函数更适合; 而砂夹壤的 E-t 可分别用线性和对数函数表达, 但线性关系不如对数函数. 为综合对比层位及覆膜开孔率等不同因素对 E-t 关系的影响, 不同土壤的函数关系拟合参数见表 1.

表 1 层状土壤累积蒸发量的拟合系数
Tab. 1 Fitting coefficients of cumulative evaporation for layered soil

层位 h/cm	u/%	壤夹砂采用幂函数: E = At ^B			砂夹壤采用对数函数: E = AA + BBln(t)		
		A	B	R ²	AA	BB	R ²
5 < h ≤ 10	0	0.013 1	0.787 3	0.999	-0.704 0	0.290 9	0.994
	0.69	0.060 0	0.778 2	0.984	-1.030 6	0.440 8	0.993
	2.78	0.166 5	0.594 7	0.950	-1.035 5	0.470 1	0.996
	7.71	0.380 0	0.443 2	0.920	-1.029 7	0.560 3	0.973
	18.70	0.847 7	0.287 8	0.863	-1.428 5	0.752 5	0.982
	100	1.504 2	0.179 5	0.804	-0.636 4	0.635 4	0.966
10 < h ≤ 15	0	0.019 9	0.680 4	0.997	-0.647 2	0.391 0	0.995
	0.69	0.113 1	0.527 7	0.996	-1.214 4	0.607 7	0.992
	2.78	0.119 9	0.686 6	0.993	-1.186 4	0.649 1	0.993
	7.71	0.223 4	0.583 0	0.946	-1.602 6	0.836 7	0.982
	18.70	0.453 7	0.450 8	0.894	-1.631 0	0.879 1	0.994
	100	0.993 4	0.301 3	0.898	-1.153 1	0.922 7	0.999
20 < h ≤ 25	0	0.012 2	0.688 6	0.988	-1.067 3	0.705 6	0.998
	0.69	0.013 9	0.972 3	0.995	-0.686 2	0.669 8	0.998
	2.78	0.022 0	0.955 2	0.998	-1.036 4	0.949 3	0.996
	7.71	0.059 0	0.815 3	0.997	-1.835 9	1.237 9	0.996
	18.70	0.509 0	0.433 2	0.938	-1.615 4	1.227 9	0.977
	100	0.593 4	0.446 6	0.975	-1.499 9	1.230 8	0.985

由表 1 可知: ① 对壤夹砂采用幂函数描述 E-t 关系时, 决定系数 R² 均大于 0.863. 层位相同时, 开孔率 u 越小, R² 越高; u 相同时, 夹砂层位越深, R² 越高. 在相同层位下, 拟合参数 A 随 u 增大而增大, 指数项 B 随 u 的增大而减小. 夹砂层位置为 5 cm < h ≤ 10 cm 时该规律最明显, 可建立 u > 0 时系数 A, B 与 u 的两因素函数关系为

$$A_{5-10} = 0.087u^{0.671}, R^2 = 0.972; \quad (1)$$

$$B_{5-10} = 0.754u^{-0.306}, R^2 = 0.981. \quad (2)$$

将式(1), (2)代入累积蒸发量的幂函数公式, 可得壤夹砂 5 cm < h ≤ 10 cm 层位时的 E-t 关系为

$$E_{5-10} = 0.087u^{0.671}t^{0.754u^{-0.306}}. \quad (3)$$

给定一个 u 值, 便可得出 t 时刻对应的壤夹砂 5 cm < h ≤ 10 cm 夹层位置的 E 值.

② 对砂夹壤采用对数公式描述 E-t 关系时, 相关系数均达 0.96 以上, 且在同一层位条件下, 参

数 AA 和 BB 大体上均随 u 的增大而增大.

3 结 论

1) 覆膜开孔率增大有整体降低层状土壤温度的作用. 层位越深, 不同覆膜开孔率下剖面土温差异越大. 层位逐渐下移时, 全覆膜与裸土蒸发表层温差分别为 3.6, 6.6 和 21.8 °C.

2) 覆膜开孔率对夹层以上水分蒸发的影响大于下层, 全覆膜的剖面含水率最大. 层位为 5 cm < h ≤ 10 cm 时, 覆膜开孔保墒不明显. 层位为 20 cm < h ≤ 25 cm 时, 覆膜保墒的作用更明显.

3) 对壤夹砂采用幂函数描述 E-t 变化规律较好, 而对壤夹砂采用对数函数较好, 还可进一步将壤夹砂 5 cm < h ≤ 10 cm 层位下的累积蒸发量表示为 E₅₋₁₀ = 0.087u^{0.671}t^{0.754u^{-0.306}}.

参考文献 (References)

- [1] Yang Q D, Zuo H C, Xiao X, et al. Modelling the effects of plastic mulch on water, heat and CO₂ fluxes over cropland in an arid region [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453:102 – 118.
- [2] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31 (4):241 – 249.
- [3] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(1): 92 – 97.
- [4] Hou X Y, Wang F X, Han J J, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of Northwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1):115 – 121.
- [5] Li Y, Shao M, Wang W, et al. Open-hole effects of perforated plastic mulches on soil water evaporation [J]. *Soil Science*, 2003, 168(11):751 – 758.
- [6] 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.
- [7] 陈世平, 李毅, 高金芳. 覆膜开孔蒸发条件下不同斥水度土壤水盐变化规律[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5):86 – 91.
- Chen Shiping, Li Yi, Gao Jinfang. Evaporation experiment on different water repellent soils under perforated plastic mulch [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5):86 – 91. (in Chinese)
- [8] 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.
- Gao Jinfang, Li Yi, Chen Shiping, et al. Effects of soil column heights on movement of soil water and soil salt during evaporation under perforated plastic mulch [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9):50 – 55. (in Chinese)
- (责任编辑 徐云峰)
-
- (上接第 737 页)
- [8] 王峰, 杜太生, 邱让建. 基于品质主成分分析的温室番茄亏缺灌溉制度[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 75 – 80.
- Wang Feng, Du Taisheng, Qiu Rangjian. Deficit irrigation scheduling of greenhouse tomato based on quality principle component analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 75 – 80. (in Chinese)
- [9] 唐晓伟, 刘明池, 郝静, 等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 970 – 977
- Tang Xiaowei, Liu Mingchi, Hao Jing, et al. Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 970 – 977. (in Chinese)
- [10] Wang F, Kang S, Du T, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1228 – 1238.
- [11] Favati F, Lovelli S, Galgano F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling [J]. *Scientia Horticulturae*. 2009, 122(4): 562 – 571.
- [12] Zegbe – Dominguez J A, Behboudian M H, Liang A, et al. Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in ‘petopride’ processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98: 505 – 510.
- [13] 邵艳莹, 郑德凤, 李莹. 基于熵权 – 模糊物元的地下水环境健康评价模型研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(12): 28, 32 – 34.
- Shao Yanying, Zheng Defeng, Li Ying. Study on groundwater environmental health assessment model based on entropy weight and fuzzy matter – element [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(12): 28, 32 – 34. (in Chinese)
- (责任编辑 徐云峰)