

液态地膜覆盖影响土表蒸发过程的机理研究^①

谷 健^{1,3}, 尹光华^{1*}, 郝 亮^{2,3}, 李文惠^{1,3}, 黄鹏飞^{1,3}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用网室盆栽试验, 观测分析了液膜覆盖下土壤水分蒸发强度的变化。结果表明: 液膜覆盖可有效抑制土壤蒸发, 根据液膜成分, 将其抑制蒸发机理划分为封闭效应和固持效应; 两种效应在不同阶段分别起主导作用, 作用强度随液膜成分的不同组成而异。用 Matlab 对不同处理进行动力学方程拟合表明, 合理使用液膜可以减少最大蒸发量, 并延长半衰期。

关键词: 液态地膜; 土表蒸发; 封闭效应; 固持效应

中图分类号: S152.7

液态地膜作为一种土壤保墒的技术手段, 具有化控节水和覆盖节水的优点, 是缓解干旱半干旱区农业水资源短缺的重要措施。国内外对液膜的应用效果开展了较多研究^[1-4], 关于其对土表蒸发的抑制也有报道^[5-9]。

关于液膜的保墒机理, 笔者将其归结为以下两方面的原因: 防止蒸发的封闭效应: 理论上任何一种物质铺设于土壤表层, 都可以形成物理阻隔层, 阻碍土表蒸发。液膜与土壤表层颗粒相结合形成土膜结构, 其本质上是在土膜结构限制下的极低水平水分通量的封闭层剖面控制的蒸发过程^[7]。结构锁水的固持效应: 液膜中网状高分子与土膜结构, 能够有效地固持土壤中的水分, 结合水较难释放, 进而减缓了土壤水分的散失。本研究对聚乙烯盆盛装的供试土壤进行液膜覆盖, 分别采用在覆盖前、后补水的方法, 测定液膜覆盖对土表蒸发强度的影响, 以揭示液膜覆盖对土表蒸发的抑制机理。

1 材料与方 法

1.1 试验地点和材料

试验于 2012 年 9 月 9—23 日在中国科学院沈阳应用生态研究所网室中进行。试验材料是以聚乙烯醇、羧甲基纤维素钠、交联剂、消泡剂、甘油及水等

为原料研制出不同配方的 3 种型号液膜, 分别为: 聚乙烯醇含量较多型 1 号液膜, 聚乙烯醇与羧甲基纤维素钠含量相等型 2 号液膜, 羧甲基纤维素钠含量较多型 3 号液膜。

1.2 试验设计

供试土壤类型为褐土, 质地为砂壤, 取自辽宁省阜新蒙古族自治县。盆口直径为 14 cm, 盆内土表直径 12 cm。每只聚乙烯盆初始土壤水分质量含水量为 120 g/kg。

试验设液膜类型、喷施浓度、补水顺序 3 个因素, 液膜类型为 1、2、3 号共 3 种, 喷施浓度分低浓度(原液用量为 600 L/hm², 按原液与水体积比 1:40 溶解)和高浓度(原液用量为 1 200 L/hm², 按原液与水体积比 1:20 溶解)共 2 个, 喷施量为 200 ml; 喷施补水顺序分喷膜前定量补水和喷膜后定量补水 2 个, 采用完全组合设计, 12 个组合, 以定量补水不喷膜为对照, 补水量均为 200 ml, 共 13 个处理, 重复 3 次。试验处理设计如下: 处理 1: 先补水后喷 1 号高浓度液膜; 处理 2: 先喷 1 号高浓度液膜后补水; 处理 3: 先补水后喷 1 号低浓度液膜; 处理 4: 先喷 1 号低浓度液膜后补水; 处理 5: 先补水后喷 2 号高浓度液膜; 处理 6: 先喷 2 号高浓度液膜后补水; 处理 7: 先补水后喷 2 号低浓度液膜; 处理 8: 先喷 2 号低浓度液

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD16B12; 2012BAD09B02; 2013BAD05B07)、国家公益性行业(农业)专项(201303125-9)和辽宁省科技攻关项目(2014213004)资助。

* 通讯作者(ygh006@iae.ac.cn)

作者简介: 谷健(1983—), 男, 山西太原人, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为农业水土资源利用与管理。E-mail: sygj981@163.com

膜后补水；处理 9：先补水后喷 3 号高浓度液膜；处理 10：先喷 3 号高浓度液膜后补水；处理 11：先补水后喷 3 号低浓度液膜；处理 12：先喷 3 号低浓度液膜后补水；处理 13：只补水不喷膜(对照, CK)。

1.3 测定项目与方法

土壤水分蒸发量的测定：用精度为 0.5 g 的电子天平测定盆土重量,连续 2 次重量差值为蒸发量,折算成 mm。观测时间为 8:00—17:00,每 3 h 称重一次。其中,12 日降水,实测蒸发强度为 0 mm。

1.4 分析方法

液膜覆盖对土表蒸发的影响主要表现为两种效应,分别为封闭效应:喷施液膜后,形成的土膜结构可阻碍下层土壤中的水分向大气转移,减少蒸发量;相应蒸发量的变化可由处理为先补水后喷膜者减去处理 13(CK)得到。固持效应:喷施液膜改变了土壤表层松散的结构,使其规则化、有序化,锁住水分。相应蒸发量的变化可由处理为先喷膜后补水者减去

处理 13(CK)得到。液膜覆盖的效果为封闭效应和固持效应的叠加,各效应值小于 0 者抑制蒸发,反之促进蒸发,其绝对值的大小反映液膜覆盖对蒸发影响的强弱。

数据采用 Microsoft Excel、Matlab 和 SPSS 16.0 进行数据处理和方差分析,多重比较用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 封闭效应与固持效应的数学模型

利用一级动力学方程 $C = C_0 \exp(-kt)$ (式中: C_0 为最大蒸发量和 k 为蒸发速率常数,而半衰期由 $\ln 2/k$ 计算获得^[12]),拟合不同处理的水分蒸发过程,得到最大蒸发量、蒸发速率常数和土壤水分半衰期 3 项指标,结果见表 1 和表 2。模型拟合结果表明,各处理土壤蒸发量随时间的变化可用一级动力学方程描述,回归系数在 0.950~0.999,达到显著水平,可用于估算相关参数。

表 1 液膜覆盖下封闭效应的数学模型
Table 1 Mathematical models of sealing effects under hydromulching

处理	模型	回归系数	最大蒸发量(mm)	蒸发速率(mm/d)	半衰期(d)
1	$C=25.58(1-\exp(-0.085\ 17x))$	0.962 6	25.58	0.085	8.14
3	$C=22.96(1-\exp(-0.106\ 5x))$	0.969 9	22.96	0.106	6.51
5	$C=29.76(1-\exp(-0.076\ 63x))$	0.970 8	29.76	0.077	9.05
7	$C=29.34(1-\exp(-0.079\ 26x))$	0.955 8	29.34	0.079	8.75
9	$C=26.50(1-\exp(-0.091\ 18x))$	0.969 6	26.50	0.091	7.60
11	$C=29.53(1-\exp(-0.081\ 64x))$	0.962 2	29.53	0.082	8.49
13	$C=28.43(1-\exp(-0.089\ 73x))$	0.960 0	28.43	0.089	7.72

表 2 液膜覆盖下固持效应的数学模型
Table 2 Mathematical models of retention effects under hydromulching

处理	模型	回归系数	最大蒸发量(mm)	蒸发速率(mm/d)	半衰期(d)
2	$C=20.07(1-\exp(-0.110\ 4x))$	0.980 2	20.07	0.110	6.28
4	$C=23.92(1-\exp(-0.089\ 01x))$	0.979 8	23.92	0.089	7.79
6	$C=20.18(1-\exp(-0.125\ 5x))$	0.986 3	20.18	0.126	5.52
8	$C=20.70(1-\exp(-0.113\ 6x))$	0.983 6	20.70	0.114	6.10
10	$C=19.15(1-\exp(-0.088\ 69x))$	0.995 1	19.15	0.089	7.82
12	$C=27.13(1-\exp(-0.070\ 28x))$	0.979 7	27.13	0.070	9.86
13	$C=28.43(1-\exp(-0.089\ 73x))$	0.960 0	28.43	0.089	7.72

2.1.1 封闭效应下的最大蒸发量、蒸发速率和半衰期 减小最大蒸发量、降低蒸发速率和延长半衰期是土壤保墒能力增强的具体体现,其中土壤水分的最大蒸发量和蒸发速率取决于土壤含水量、土壤的性质和大气蒸发强度。由表 1 可知,1 号、2 号液膜的最大蒸发量随着施用浓度的增加而增加,但其蒸发速率随着浓度的增加而减小;而 3 号液膜呈现相反现象;液膜覆盖后的土壤,其半衰期一般有所延长,只

有处理 3 和处理 9 小于对照。

2.1.2 固持效应下的最大蒸发量、蒸腾速率和半衰期 由表 2 可知,各处理的最大蒸发量皆小于对照,说明液膜覆盖后,固持效应减少了土壤中易散失的水分,增强土壤的保墒能力。

2.2 液膜覆盖的封闭效应

根据液膜的保墒机理,自制液膜成分包括封闭性因子和固持性因子,其中封闭性因子是指液膜中的线

性高分子聚乙烯醇及土膜结构能够有效地约束土壤中水分的扩散传输过程,起封闭作用,减少水分蒸发。

2.2.1 低浓度液膜覆盖的封闭效应 根据图 1 中各封闭效应抑制蒸发强弱的趋势,结合表 1 中的封闭效应动力学模型,将蒸发过程分别划分为 3 个阶段:处理 3 在 0~80 h 为第一阶段,强度为 9.41×10^{-2} mm/d; 80~240 h 为第二阶段,强度为 -8.27×10^{-2} mm/d; 240 h 以后无明显变化。处理 7 在 0~108 h 为第一阶段,强度为 -5.01×10^{-2} mm/d; 108~264 h 为第二段,强度为 -1.27×10^{-2} mm/d; 264~336 h 为

第三段,强度为 -0.86×10^{-2} mm/d; 3 个阶段均表现为抑制蒸发,但抑制作用逐次减弱。处理 11 在 0~168 h 为第一阶段,强度为 -2.03×10^{-2} mm/d; 168~264 h 为第二阶段,强度为 2.62×10^{-2} mm/d; 264~336 h 为第三段,强度为 -0.73×10^{-2} mm/d; 3 个阶段对蒸发分别起到抑制-促进-抑制的作用,但整体的抑制作用大于促进作用。3 种处理下,封闭效应皆较明显。第一阶段,处理 3 促进蒸发,与其余两种处理不同;全过程中处理 3 的封闭效应最强,且持续时间较长,与 CK 相比,达到显著水平。

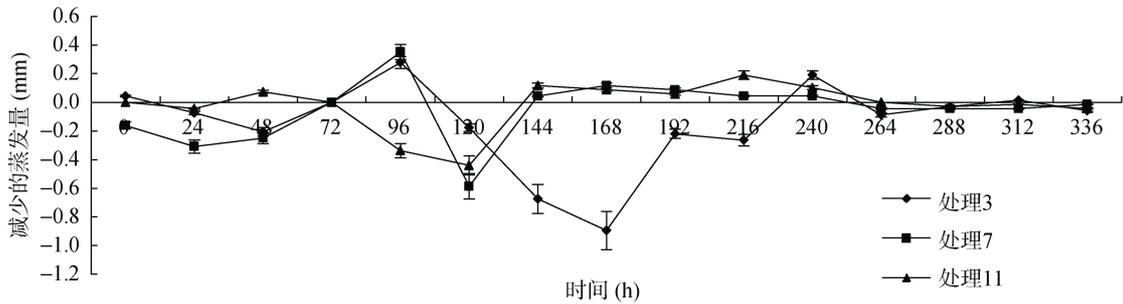


图 1 低浓度液膜的封闭效应
Fig. 1 Sealing effect of low-concentration hydromulching

2.2.2 高浓度液膜覆盖的封闭效应 图 2 显示,与低浓度相似,高浓度液膜的封闭效应也呈现阶段变化。结合表 1 中的动力学模型分析,将蒸发过程分别划分为 3 个阶段:处理 1 在 0~224 h 为第一阶段,强度为 -6.43×10^{-2} mm/d; 224~336 h 为第二阶段,强度为 1.83×10^{-2} mm/d。处理 5 在 0~156 h 为第一阶

段,强度为 -5.7×10^{-2} mm/d; 156~336 h 为第二阶段,强度为 3.58×10^{-2} mm/d。处理 9 在 0~172 h 为第一阶段,强度为 -4.58×10^{-2} mm/d; 172~336 h 为第二阶段,强度为 9.95×10^{-3} mm/d。高浓度液膜的封闭效应也表现为对蒸发起抑制或促进两个方面;与低浓度时相比,封闭效应不仅明显增强,且时间也有所延长。

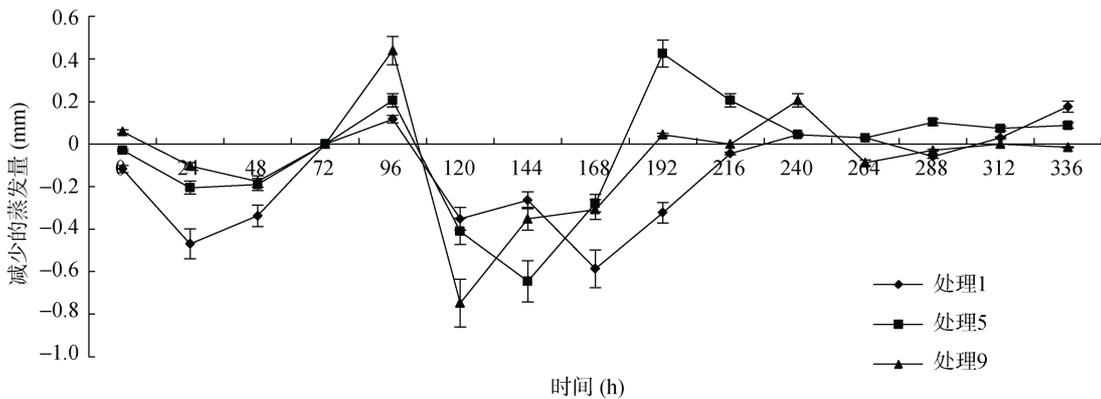


图 2 高浓度液膜的封闭效应
Fig. 2 Sealing effect of high-concentration hydromulching

2.3 液膜覆盖的固持效应

固持性因子是指液膜中在过渡金属盐的存在下形成网状的羧甲基纤维素钠^[10]及土膜结构可以与土壤中的水分结合,固持土壤水分。

2.3.1 低浓度液膜的固持效应 图 3 所示,固持效

应对蒸发的影响呈阶段性变化。结合表 2 中的固持效应动力学模型分析,将蒸发过程分别划分为 3 个阶段:处理 4 在 0~168 h 为第一阶段,强度为 -4.85×10^{-2} mm/d; 168~336 h 为第二阶段,强度为 3.11×10^{-2} mm/d。处理 8 在 0~200 h 为第一阶段,强度为

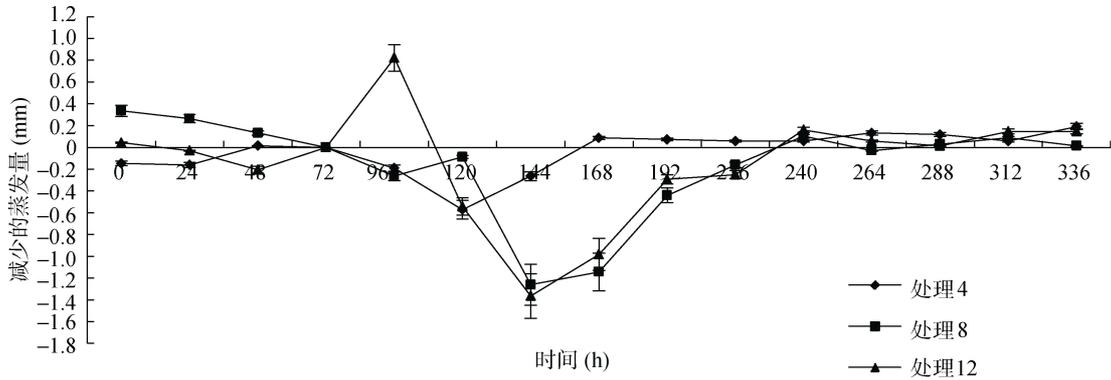


图 3 低浓度液膜的固持效应
Fig. 3 Retention effect of low-concentration hydromulching

-5.01×10^{-2} mm/d; 200 ~ 336 h 为第二阶段, 强度为 1.17×10^{-2} mm/d。处理 12 在 0 ~ 192 h 为第一阶段, 强度为 -8.72×10^{-2} mm/d; 192 ~ 336 h 为第二阶段, 强度为 2.41×10^{-2} mm/d。3 种处理下, 固持效应皆为负值; 对蒸发的影响皆表现为先抑制后促进, 抑制作用大于促进作用。其中, 处理 8 的固持效应最强; 但与对照相比, 3 种处理的固持效应均未达到显著水平。

2.3.2 高浓度液膜的固持效应 图 4 显示 与低浓度时相似, 高浓度液膜的固持效应也呈现阶段变化。

结合表 2 中的固持效应动力学模型分析, 将蒸发过程分别划分为 3 个阶段: 处理 2 在 0 ~ 100 h 为第一阶段, 强度为 4.22×10^{-2} mm/d; 100 ~ 236 h 为第二阶段, 强度为 -10.59×10^{-2} mm/d; 236 ~ 336 h 为第三阶段, 强度为 0.39×10^{-2} mm/d。处理 6 在 0 ~ 100 h 为第一阶段, 强度为 6.03×10^{-2} mm/d; 100 ~ 236 h 为第二阶段, 强度为 -14.13×10^{-2} mm/d; 236 ~ 336 h 为第三阶段, 强度为 0.82×10^{-2} mm/d。处理 10 在 0 ~ 196 h 为第一阶段, 强度为 -14.95×10^{-2} mm/d; 192 ~ 336 h 为第二阶段, 强度为 1.38×10^{-2} mm/d。

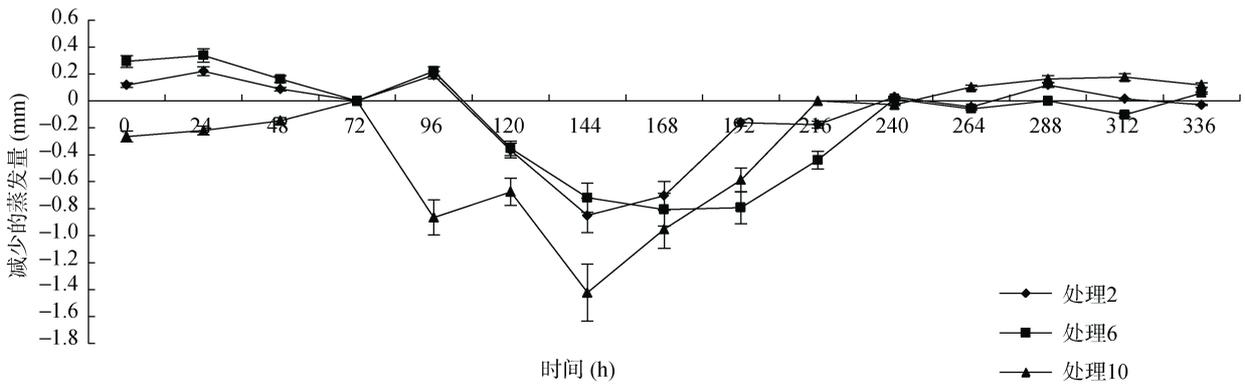


图 4 高浓度液膜的固持效应
Fig. 4 Retention effect of high-concentration hydromulching

全过程中 3 种处理的固持效应均为负值, 且阶段性变化亦表现为对蒸发先促进后抑制, 其中抑制作用强于促进作用。与对照相比, 仅处理 10 固持效应达到显著水平, 至于其他 2 种处理只有阶段性效应达到显著水平。

2.4 液膜覆盖封闭效应和固持效应的关系

2.4.1 低浓度液膜覆盖的和效应 液膜覆盖的和效应是由封闭效应和固持效应共同决定的。低浓度液膜覆盖下, 3 种液膜对蒸发影响的和效应为负值(图 5~图 7), 并且均达到显著水平, 表明液膜覆盖能够

减少土壤蒸发。由于整个蒸发过程中封闭效应和固持效应均表现出阶段性变化, 因此和效应也呈现阶段性变化。

根据表 1 和表 2 中封闭和固持效应的动力学模型, 进行叠加分析, 可以得出: 1 号液膜的和效应(处理 3 与处理 4 之和)在 0 ~ 96 h 为第一阶段, 强度为 -3.12×10^{-2} mm/d; 96 ~ 236 h 为第二阶段, 强度为 -11.04×10^{-2} mm/d; 236 ~ 336 h 为第三阶段, 强度为 2.25×10^{-2} mm/d。2 号液膜和效应(处理 7 与处理 8 之和)在 0 ~ 100 h 为第一阶段, 强度为 -0.43×10^{-2} mm/d;

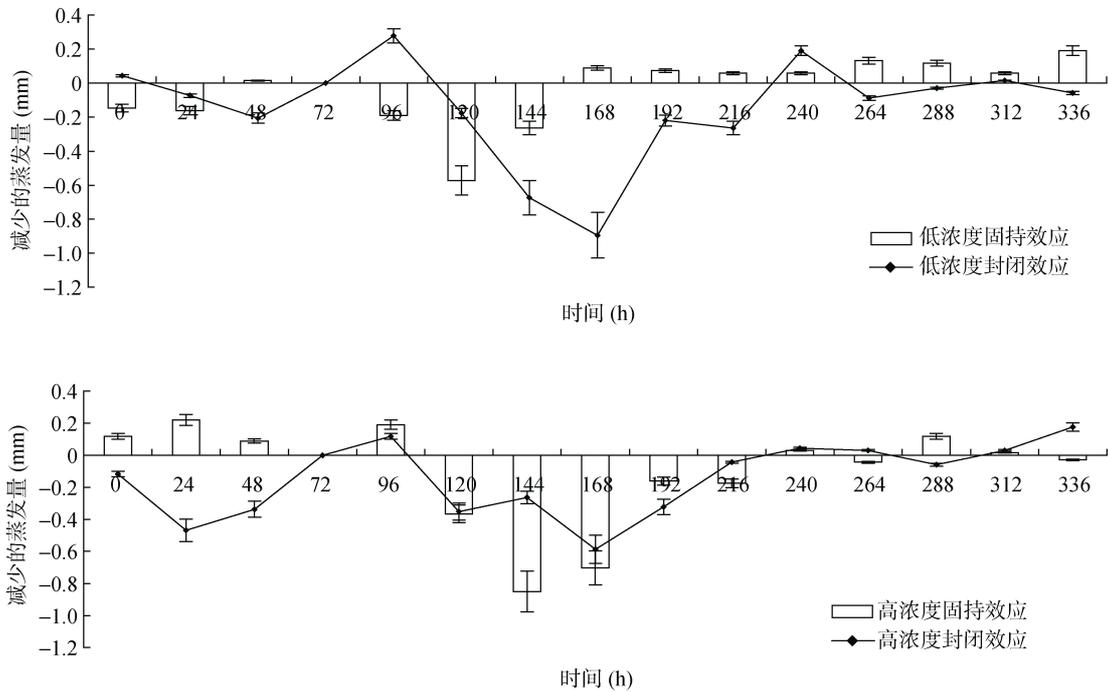


图 5 1号液膜在不同浓度下的和效应

Fig. 5 Combined effects No.1 hydromulching under different concentrations under different concentrations

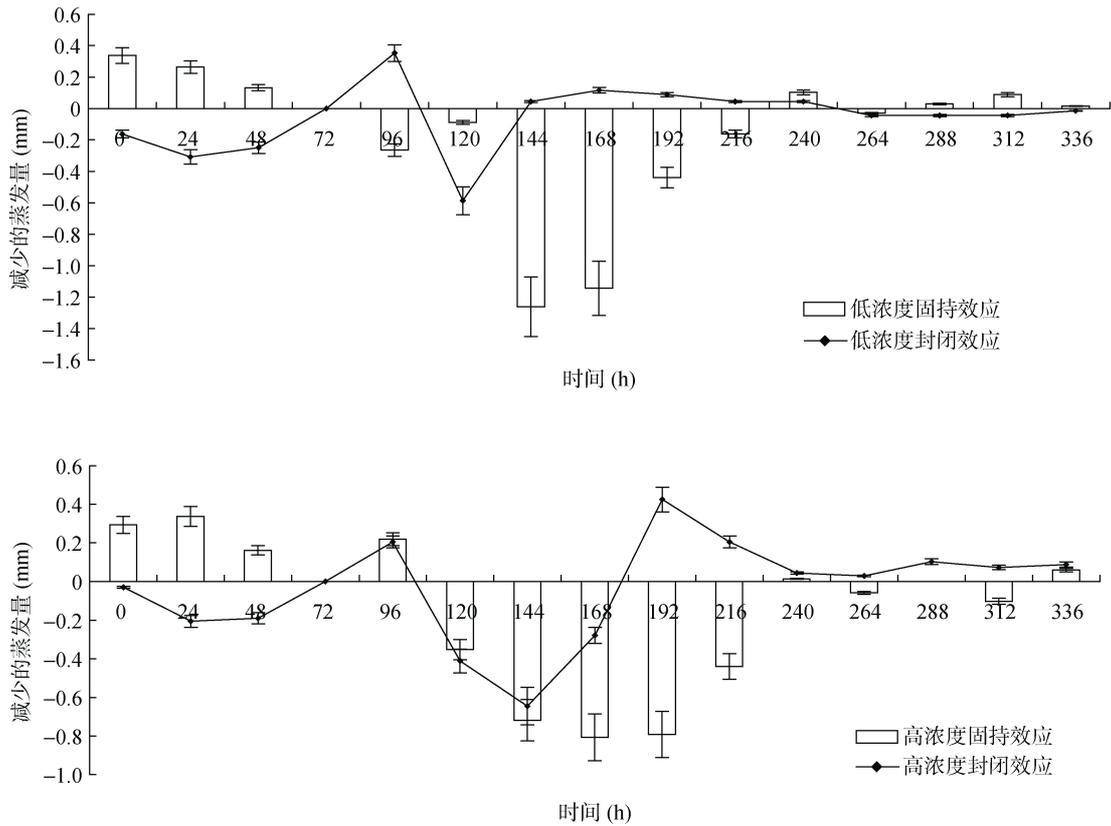


图 6 2号液膜在不同浓度下的和效应

Fig. 6 Combined effects of No.2 hydromulching under different concentrations

100 ~ 196 h 为第二阶段, 强度为 $-21.17 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$; 196 ~ 336 h 为第三阶段, 强度为 $-0.63 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$ 。3号液膜和效应(处理 11 与处理 12 之和)在 0 ~ 100 h 为

第一阶段, 强度为 $1.12 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$; 100 ~ 196 h 为第二阶段, 强度为 $-21.36 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$; 196 ~ 336 h 为第三阶段, 强度为 $3.21 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$ 。

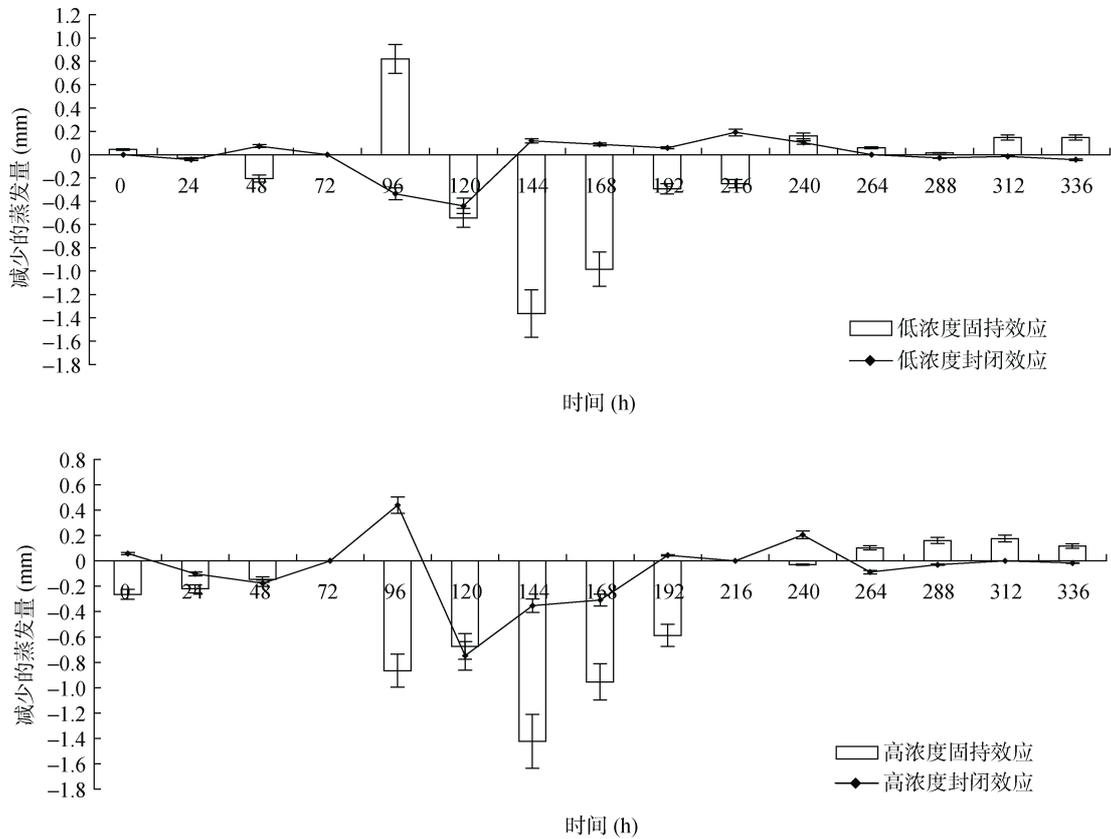


图 7 3 号液膜在不同浓度下的和效应
Fig. 7 Combined effects of No.3 hydromulching under different concentrations

在整个蒸发阶段,封闭效应和固持效应对蒸发皆起到抑制作用,但两效应对蒸发的影响并不等同,存在主导与非主导关系,从而决定了和效应抑制蒸发的强弱。全过程中,1 号液膜的主导效应为封闭效应,而 2 号、3 号液膜的主导效应为固持效应。不同蒸发阶段,封闭效应和固持效应间也存在主导与非主导关系,且不同蒸发阶段主导效应不同,从而影响和效应的阶段性变化。

2.4.2 高浓度液膜覆盖的和效应 高浓度液膜覆盖下的封闭效应和固持效应间的关系和低浓度表现出相似规律,其和效应一般较低浓度时明显,其中 3 号液膜达到极显著水平。

同样,根据表 1 和表 2 中封闭和固持效应的动力学模型,进行叠加分析,可以得出高浓度液膜和效应的阶段性变化:1 号液膜在 0~100 h 为第一阶段,强度为 -1.46×10^{-2} mm/d; 100~204 h 为第二阶段,强度为 -20.94×10^{-2} mm/d; 204~336 h 为第三阶段,强度为 -1.62×10^{-2} mm/d。2 号液膜在 0~100 h 为第一阶段,强度为 4.65×10^{-2} mm/d; 100~236 h 为第二阶段,强度为 -17.06×10^{-2} mm/d; 236~336 h 为第三阶段,强度为 1.26×10^{-2} mm/d。3 号液膜在 0~100 h 为第一阶段,强度为 -8.28×10^{-2} mm/d; 100~192 h 为

第二阶段,强度为 -32.46×10^{-2} mm/d; 192~336 h 为第三阶段,强度为 2.74×10^{-2} mm/d。

在先补水后喷膜条件下,液膜中的线性高分子可以有效阻止土壤水分散失,但浓度达到一定值后,增加线性高分子用量保墒效果不再发生显著变化。液膜中的网状高分子是在满足自身吸附后,其凝胶吸附水才逐渐向土壤中转移。分布于土壤中的网状高分子,是以未饱和吸附的凝胶累积量,构成土壤增加的水分量,所以表现出土壤水分量随网状高分子加入量增加的特征^[11]。

结合和效应分析,1 号液膜的主导效应为封闭效应,而 2 号、3 号液膜的主导效应为固持效应。因此,在喷施液膜时,1 号液膜选用高浓度(原液用量为 600 L/hm²,按原液与水体积比 1:40 溶解),2、3 号液膜选用低浓度(原液用量为 1 200 L/hm²,按原液与水体积比 1:20 溶解),不仅能降低最大蒸发量,而且能够延长半衰期,使用方法比较合理。

3 结论与讨论

液膜覆盖可有效抑制土壤蒸发。根据液膜成分,将其抑制蒸发机理划分为封闭效应和固持效应;两种效应在不同阶段分别起主导作用,作用强度随液膜成

分的不同组成而异。合理使用液膜可以减少最大蒸发量,并延长半衰期。

以往的研究中,只将有液膜覆盖进行对比,探讨液膜覆盖对土表蒸发的影响^[3-9]。这样的研究无法区分因土壤自身含水量不同引起的蒸发量差异,且液膜成分对土表蒸发的影响机理亦不同。鉴于上述问题,本研究按液膜中不同高分子的类型将其对土表蒸发的影响分为封闭效应和固持效应两个方面。液膜的封闭效应和固持效应是由其成分中的线性和网状高分子的特性以及土膜结构决定的,并非每种液膜都具有此两种效应。因此,在研究液膜的保墒机理时,应标明液膜的功能成分。

本试验研究过程中,封闭效应的最大蒸发量与半衰期一般会随着聚乙烯醇和羧甲基纤维素钠比例的减少而增加,原因可能在于线性高分子在土壤中易于移动,因此占据的空间较大,结合部分土壤水;也可能由于液膜改善了土壤的孔隙结构,增加了毛细吸水量;也可能是两者的综合作用的结果。而固持效应的最大蒸发量和半衰期则通常会随着聚乙烯醇和羧甲基纤维素钠比例的减少而减少,土壤表层的网状高分子及土膜结构,在水分入渗的过程中起固持作用,而这部分固持水相较于土壤毛细管等所持有的水分更难于蒸发,因此减少了蒸发量。

参考文献:

- [1] Chiellini E, Cinelli P, D'Antone S, et al. Liquid mulch based on poly (vinyl alcohol). PVA-soil interaction[C]// Macromolecular symposia. WILEY-VCH Verlag, 2003, 197(1): 133-142
- [2] Chiellini E, Cinelli P, Magni S, et al. Fluid biomulching based on poly (vinyl alcohol) and fillers from renewable Resources[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 108(1), 295-301
- [3] 陈伟通, 罗锡文, 周志艳, 等. 液体地膜覆盖对直播稻抵御芽期低温的效果[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(1): 99-101
- [4] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先, 等. 液体地膜覆盖棉花高产机理研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2 520-2 527
- [5] 尹光华, 佟娜, 郝亮, 等. 不同材料膜覆盖对土壤水分和花生产量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 204-207
- [6] 张洁, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 液态地膜对土壤物理性状的影响及增产效果[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 338-340
- [7] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先, 等. 液体地膜覆盖保水效应研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 29-32
- [8] 赵丹, 李毅, 冯浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1 058-1 068
- [9] 李云光, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌条件下液体地膜覆盖土壤保温保湿效应及棉花生长响应. 土壤, 2015, 47(6): 1 170-1 175
- [10] 王柳, 张传杰, 朱平. 海藻酸钠-羧甲基纤维素钠共混纤维的制备及其吸湿性能[J]. 功能高分子学报, 2010, 23(3): 12-16
- [11] 宋宝兴. 高分子材料在旱地农作物生产中的应用基础研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2007: 47-52
- [12] 李丹. 生物质液态地膜的研制及其应用效果[D]. 浙江: 浙江大学, 2011: 20-25

Mechanism of Hydromulching Effects on Soil Evaporation Process

GU Jian^{1,3}, YIN Guanghua^{1*}, HAO Liang^{2,3}, LI Wenhui^{1,3}, HUANG Pengfei^{1,3}

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2 Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The net chamber experiment was conducted to study soil evaporation intensity with degradable hydromulching. The results showed that degradable hydromulching inhibited soil evaporation process. According to hydromulching ingredients, the mechanisms were divided into sealing effect and retaining effect. Both effects played a leading role at different stages, and the intensity varied with the composition ratio of hydromulching. Different processing with Matlab kinetic equation showed that hydromulching could reduce maximum evaporation and extend its half-life with reasonable amount.

Key words: Hydromulching; Soil evaporation; Sealing effect; Retaining effect