

新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律

张 治, 田富强*, 钟瑞森, 胡和平

(清华大学水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 覆膜条件下地温将发生改变, 为研究其变化规律, 2008 和 2009 年在新疆库尔勒市开展了棉花膜下滴灌田间试验, 设置了不同灌溉处理和地表覆盖情况的试验小区, 对土壤水热状况进行了监测和对比, 结果表明: 气象条件、土壤水分、地膜和棉株覆盖等因素综合影响棉花生育期地温分布规律, 出苗期 15 cm 深度处膜下地温高于膜间 1.6℃, 蕾期和花铃期膜间地温逐渐超过膜下, 吐絮期二者又趋于相等; 土壤水分和温度存在耦合作用, 土壤含水率高则热容量大, 相应的温度变化幅度小, 但在相同的含水率下, 覆膜处理平均地温高于无膜处理。研究表明, 膜下滴灌有效起到保温保墒作用, 克服土壤高地温低含水率或低地温高含水率的矛盾, 可为作物生长创造较好的土壤水热条件。

关键词: 灌溉, 棉花, 温度, 土壤水分, 地温, 干旱区, 膜下滴灌

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.007

中图分类号: S152.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0044-08

张 治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 44—51.

Zhang Zhi, Tian Fuqiang, Zhong Ruisen, et al. Spatial and Temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 44—51. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

膜下滴灌条件下, 土壤中的水盐热分布规律与传统大水漫灌方式有显著差别。在水盐方面, 国内外学者开展了大量的研究^[1-2], 涉及灌溉水质^[3-4]、毛管布置方式^[5]和土壤改良剂施用^[6]等内容; 在水热方面, 膜下滴灌下地温呈现出特殊的时间和空间分布规律, 国内外学者在研究中得到了一些结论: 在覆膜条件下, 棉田土壤的水热状况得到改善, 作物出苗率、生长状况和最终产量都有了很大提高^[7-8]; 覆膜切断土壤水分蒸发, 降低潜热消耗, 促使地温升高^[9-10]; 膜下滴灌条件下, 根区的水热状况得到明显改善, 地温随气温变化而改变, 随着深度增加, 变幅渐渐平缓, 且伴有滞后效应^[11-12]; 由于滴灌水到达的深度较浅, 棉花根系也多分布在地表 40 cm 的范围内, 地膜的保温提墒作用进一步促进了土壤水分的利用^[13-14]; 一些研究还针对棉田潜热与感热的分配通量展开, 分析了膜下滴灌条件下田间小气候的变化情况^[15-16]。在模型模拟方面, 以色列学者 Mahrer 等人较早地从理论上对土壤覆膜的水热运移问题进行了研究, 建立了透明塑膜覆盖层的热平衡方程^[17]; 吴从林, 黄介生等建立了地膜覆盖下 SPAC (soil plant atmosphere continuum) 系统水热耦合运移模型, 将整个连续体分为大气、植物冠层、地膜覆

盖层和土壤层 4 层, 模拟结果表明模型具有一定的精度^[18-19]; 一些学者还借助 Hydrus 等模型软件对土壤水热运移规律进行了研究^[20]。

但总的来说, 对于新疆地区膜下滴灌条件下棉田土壤水热状况的田间试验观测和模型模拟研究都还非常有限。新疆是我国水资源严重缺乏的地区, 农业生产严重依赖于灌溉; 新疆也是我国棉花的主产区, 2007 年新疆棉花产量 301.3 万 t, 占全国产量的 40% 以上, 达到了世界棉花总产量的十分之一^[21]。目前, 膜下滴灌技术作为一种节水高产的灌溉技术, 在新疆地区棉花种植方面已经得到了广泛的应用^[22]。土壤水热分布对于作物生长非常重要, 特别是覆膜能够有效地起到保温作用, 在出苗阶段提高出苗率; 覆膜能够切断蒸发, 在棉花生育期内调节土壤水热状况, 促进作物生长。目前, 针对新疆膜下滴灌棉田土壤水热状况的田间观测资料较为缺乏, 研究中对其地温变化特征尚未进行过系统的梳理; 同时, 以往的观测手段多为人工观测, 数据资料不连续, 因此研究也多是基于典型日进行, 代表性不足。本文以新疆库尔勒市田间试验的观测资料为基础, 对膜下滴灌棉田的土壤水热状况进行综合研究, 并着重分析不同阶段、不同位置和不同覆盖条件下的地温变化规律, 以期在土壤水热变化规律的基础上更好地开展农业生产实践。

1 田间试验介绍

膜下滴灌棉花田间试验在新疆巴音郭楞蒙古自治州水管处灌溉试验站进行 (86°12'E, 41°36'N), 试验站位于库尔勒市尉犁县西尼尔镇境内, 海拔 886 m, 属干旱区, 暖温带大陆性荒漠气候, 干旱少雨, 蒸发强烈, 昼夜温差大。多年平均降水量 58.6 mm, 多年平均蒸发量 2 788.2 mm (采用直径 20 cm 蒸发皿测量), 日照时数 3 036.2 h, 年

收稿日期: 2010-05-22 修订日期: 2010-09-26

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2007BAD38B01)

作者简介: 张 治 (1987—), 博士生, 主要从事内陆干旱区农业水资源利用研究工作。北京 清华大学水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 100084。Email: z-zhang05@mails.tsinghua.edu.cn

*通信作者: 田富强 (1975—), 副教授, 主要从事水文模型、农业水管理、防洪减灾及水信息学等领域的研究工作。北京 清华大学水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 100084。

Email: tianfq@tsinghua.edu.cn

平均气温 11.48℃，大于等于 10℃积温 4 121.2℃，经测定，试验区土壤以粉砂和细砂为主。试验选用新陆中 21 号棉花品种，采用“一膜一管四行”的棉花种植和滴灌布设方式，即滴灌管布置在 4 行棉花中间，棉花在滴灌管两侧呈对称分布，并覆盖一张地膜（图 1）。滴灌毛管采用迷宫式单翼滴灌带，直径 16 mm，滴头间距 30 cm^[23]。

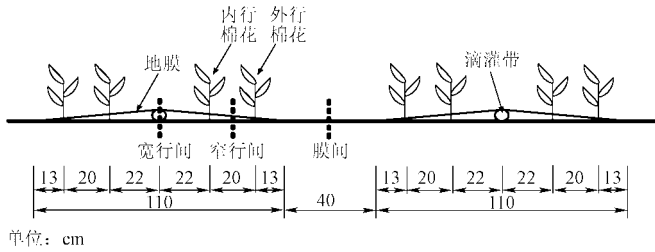


图 1 棉花种植和覆膜滴灌布设方式

Fig.1 Layout of cotton planting and mulched drip irrigation system

棉花于 4 月中旬播种，当年 10 月上旬收获。试验观测分别于 2008-05—2008-09 和 2009-05—2009-09 进行，该时段属于棉花的生育阶段。为研究不同灌溉定额对地温的影响，根据当地生产实践积累的灌溉经验，对各试验小区的灌溉制度进行了设计。观测试验在灌溉定额为 525 mm 的标准处理试验区及 375 mm 的对照处理试验区分别进行，滴头流量为 3.0 L/h，灌溉制度如表 1 所示；同时，为研究作物覆盖和地膜覆盖对地温分布的影响，还设置了 525 mm 无作物种植处理和 525 mm 无作物种植且无地膜覆盖处理。

试验监测项目主要包括气象状况、土壤水分和地温等，监测方法为：采用 WATCHDOG 自动气象观测仪监测气象状况，记录时间间隔为 5 min，监测降水、水面蒸发、气温（日平均、最高和最低）、空气湿度、辐射、日照时数、2 m 高处风速、水气压等数据；采用土壤水分、温度自动采集系统 Hydra，在灌溉定额为 525 mm 的标准

表 1 棉花生育期灌溉制度

Table 1 Irrigation scheduling for cotton

灌溉次数	灌溉日期/ (月-日)	生育阶段	灌溉定额 375 mm		灌溉定额 525 mm	
			灌溉比例/%	灌水定额/mm	灌溉比例/%	灌水定额/mm
1	06-16		5.5	20.6	5.8	30.0
2	06-23	蕾期	6.9	25.8	7.1	37.3
3	06-30		6.9	25.8	7.1	37.3
4	07-07		9.5	36.0	10.0	52.6
5	07-14	花期	11.0	41.2	11.4	60.0
6	07-22		11.0	41.2	11.4	60.0
7	07-28		11.0	41.2	11.4	60.0
8	08-04		11.0	41.2	11.4	60.0
9	08-11	铃期	8.3	31.2	8.7	45.3
10	08-18		6.9	25.8	7.1	37.3
11	08-25	吐絮期	6.0	22.5	4.3	22.6
12	09-01		6.0	22.5	4.3	22.6
合计			100	375	100	525

处理试验区采集连续的土壤水热数据，探头埋设深度为 50 cm，采集间隔为 15~60 min；为进一步补充数据资料以分析土壤水热变化规律，除 Hydra 外，对 525 和 375 mm 所有处理均采用取土烘干法测量土壤含水率，取样深度为 150 cm，直角地温计测量地温，观测深度为 25 cm。

2 结果与分析

2.1 地温随时空的基本变化规律

利用直角地温计测量了 2009 年 7 月 18 日至 27 日连续 10 d 375 mm 灌溉处理下土壤 5、15、25 cm 深度处的地温变化（图 2）。可以看出，深度 5 cm 处地温波动剧烈，25 cm 处地温变化平缓，且出现滞后效应；525 mm 灌溉处理地温呈现出了相同的变化规律，地温变幅见表 2。

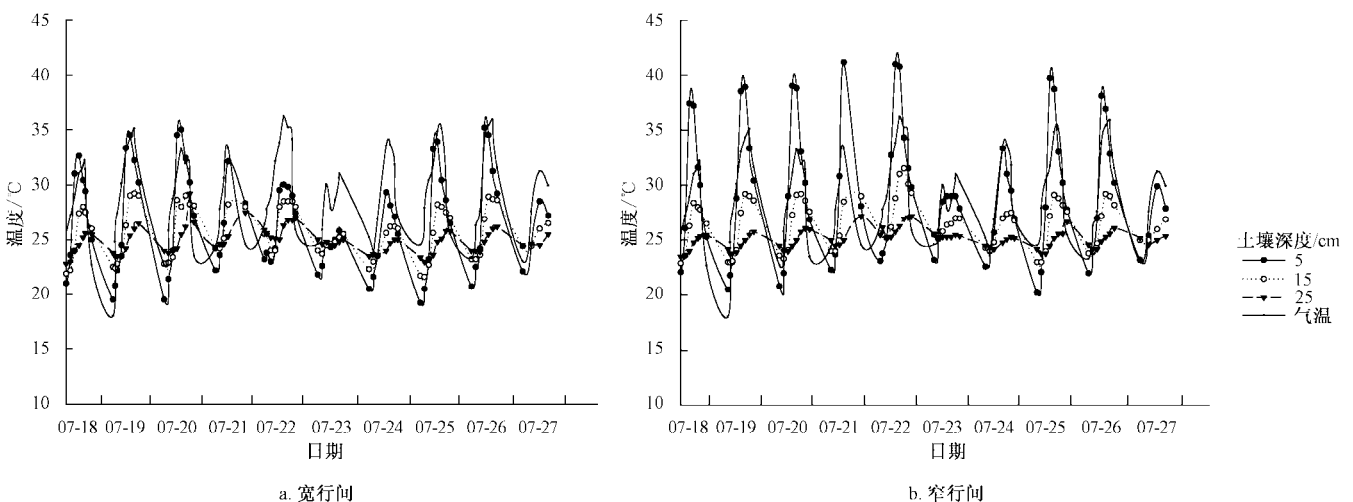


图 2 375 mm 灌溉定额条件下地温随土壤深度变化图

Fig.2 Soil temperature dynamics at different depths (irrigation volume 375 mm)

表2 地温变化幅度值(7月18日~27日)

Table 2 Variation range of soil temperature (July 18-27)

深度/cm	灌溉定额 375mm		灌溉定额 525mm		平均变幅 /°C
	宽行间 变幅	膜间 变幅	宽行间 变幅	膜间 变幅	
	5	16.0	21.0	16.1	
25	6.4	3.7	7.0	8.6	6.4

利用 Hydra 连续观测数据知, 30 cm 深度处地温变化滞后 15 cm 深度 2~4 h 左右。膜间浅层地温波动大于膜下, 在天气晴好的正午, 膜间土壤表层温度甚至高于气温 4°C~7°C。5 cm 深度处地温最高值出现在 16:00 (北京时间, 下同), 最低值出现在 8:00; 15 cm 深度处地温最高值出现在 20:00, 最低值出现在 10:00。地温和气温在日内大致按正弦曲线规律变化, 呈现正相关关系; 随着土壤深度的增加, 地温波动幅度减小, 变化出现滞后。

2.2 地温在生育期各阶段的变化

生育期内棉田地温分布随时间逐渐变化, 并在出苗、蕾、花铃和吐絮期内呈现出不同的规律。试验地区棉花的主要生育期大致从 5 月开始到同年 9 月结束, 利用 Hydra 土壤水分、温度自动采集系统监测 2009 年 5 月至 9 月地温的动态变化。以 525 mm 灌溉处理土壤 15 cm 深度处的地温为代表进行分析:

出苗期棉株刚刚长出, 地表尚未形成作物覆盖, 这一阶段没有灌溉, 土壤处于较干的状态。出苗期由于覆膜的保温作用, 宽行间和窄行间地温明显高于膜间, 膜下与膜间这一阶段平均温差为 1.6°C, 在日照充足的白天温差甚至可以达到 4°C~5°C (图 3a), 其中, 膜下代表宽行间和窄行间观测数据的平均值(下同)。膜下较高的地温有效地促进了棉株的出苗和生长, 保证了幼株的成活率。

进入蕾期后, 一方面棉株逐渐生长, 形成了较为茂密的作物覆盖; 另一方面田间开始滴灌, 膜下土壤水分含量远远超过了膜间, 湿土的热容量较干土大, 湿土吸收相同的热量后升温较干土小, 两方面的原因共同导致了膜间地温逐渐接近于膜下(图 3b)。进入花铃期后, 以上两方面作用进一步加强, 膜间地温甚至超过了膜下, 膜间温度平均高于窄行间和宽行间 0.8°C、1.2°C, 灌溉结束时甚至高出 5°C 以上, 差距明显(图 3c)。就夜间地温来说, 在蕾期和花铃期 2 个阶段, 膜下较膜间地温依然高出 0.2~1.1°C 不等。

进入花铃后期及吐絮期初期, 作物生长茂密, 膜间逐渐形成了作物覆盖, 因此膜下与膜间的地温差值变小。同时, 由于库尔勒年内气温最高的月份为 6 月和 7 月, 吐絮期所在的 8 月末气温已经逐渐下降, 因此这一时期内平均地温较之前有所降低, 且波动幅度减小, 波形趋于平缓(图 3d)。

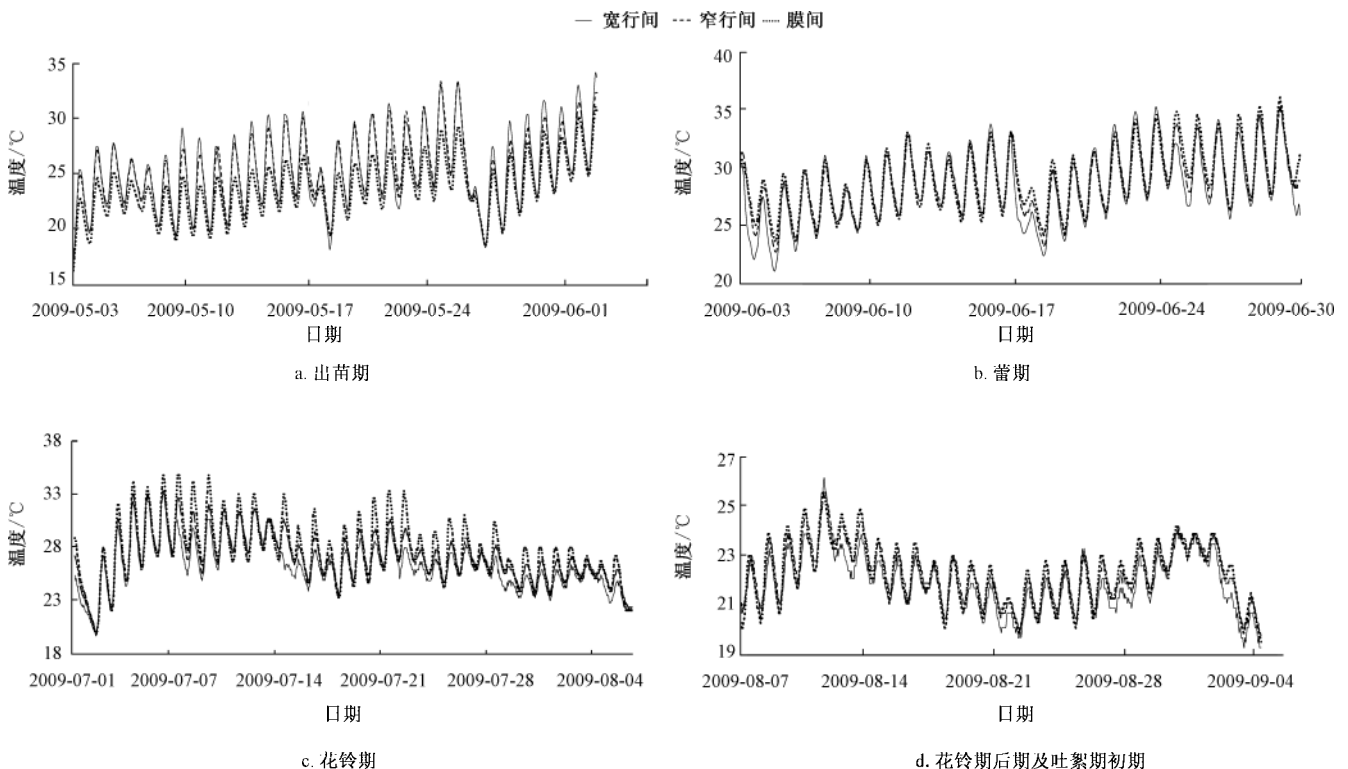


图3 15 cm 深度, 525 mm 灌溉定额条件下地温动态变化

Fig.3 Soil temperature dynamics (soil depth 15 cm, irrigation volume 525 mm)

气象条件、土壤水分、地膜和棉株覆盖等诸多因素, 共同形成了棉花生育期的地温分布规律。图 4 表示 525 mm 灌溉处理 15 cm 处地温在生育期各阶段内的平均温度, 可以看出, 出苗期由于覆膜作用, 宽行间和窄行

间地温高于膜间; 从蕾期到花铃期, 由于作物覆盖的遮荫作用及土壤含水率高等原因, 宽行间和窄行间地温低于膜间, 而宽行间土壤含水率大于窄行间, 因此宽行间地温低于窄行间; 进入吐絮期, 灌溉水量减少, 宽行间、

窄行间和膜间地温的差别逐渐缩小。由于在不同阶段发挥主导作用的因素不同，地温的时空分布特点存在差异。

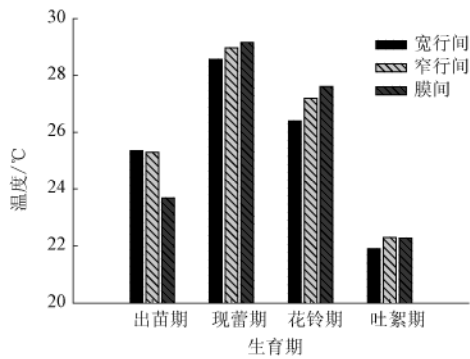


图 4 15 cm 深度，525 mm 灌溉定额条件下棉花生育期各阶段平均地温

Fig.4 Averaged soil temperature in different cotton growth phases (soil depth 15 cm, irrigation volume 525 mm)

2.3 作物覆盖对地温变化规律的影响

当作物逐渐生长形成覆盖后，作物的遮荫作用大大

降低了地温，有作物处理的地温明显低于无作物处理，试验结果反映了这一规律，以 525 mm 灌溉定额处理下 5 cm 深度处地温变化为例（图 5a, b）。有作物处理几乎完全被覆盖，无作物处理则未种植任何棉株，二者下垫面条件差别显著，因此地温出现了较大差别；值得注意的是，膜间部位作物覆盖率低，因此有无作物处理的地温差别并不显著。从 25 cm 深度范围内的平均地温来看，在 2009 年 7 月 18 日至 27 日这段时期内，作物覆盖膜下平均气温 26.3℃，膜间 27.5℃；无作物覆盖处膜下平均气温 30.4℃，膜间 29.6℃，膜下与膜间在有无作物覆盖的区别下差值分别为 4.1℃和 2.1℃。膜间地温分布具有如下特点：在浅层，如 5 cm 处，地温直接受太阳辐射影响，差别不大；但在深层，经过土壤的热量传输，地温进行了再分布，作物覆盖下土壤总体接受的能量少，膜间能量向膜下横向传输，最终导致了 25 cm 深度范围内膜间地温在有无作物覆盖条件下的差异。以膜间 20 cm 深度为例，作物覆盖处理地温低于无作物处理 2.3℃，差别明显（图 5c）。

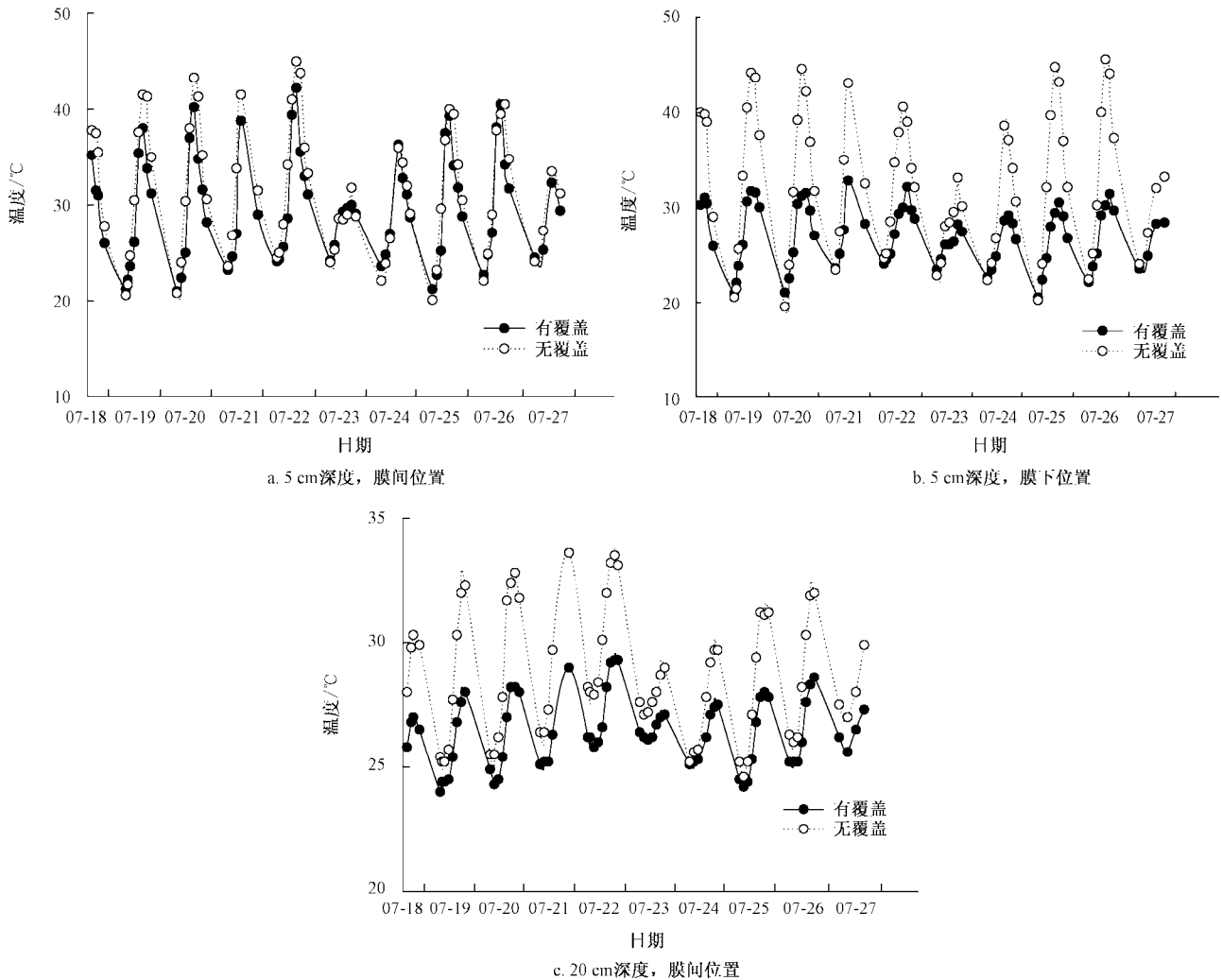


图 5 525 mm 灌溉定额条件下地温在有无作物覆盖条件下的对比

Fig.5 Comparison of soil temperature under different growing conditions (irrigation volume 525 mm)

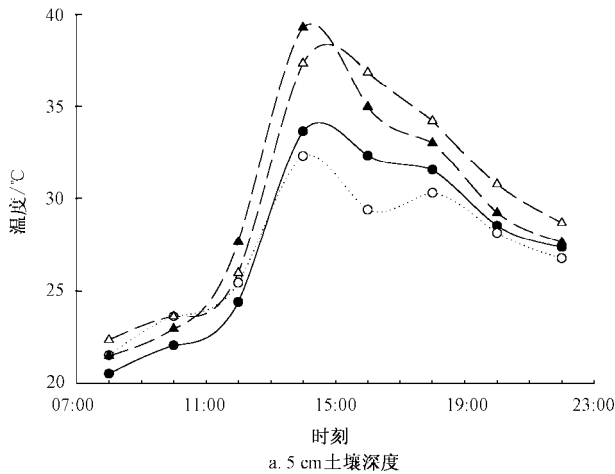
2.4 土壤含水率对地温变化规律的影响

在试验中，不同的小区采用了不同的灌溉量，以分

析不同的土壤含水率对地温分布的影响。试验选择灌溉定额为 525 和 375 mm 的小区，利用直角地温计分别测量

其 25 cm 深度范围内的地温, 利用打钻取土测量其土壤含水率, 得到一系列数据结果。由于地温与气温关系密切, 故在 2009 年 7 月 19 日—8 月 8 日这一时段内选取了 8 个气象状况接近的典型日, 分别是 7 月 19 至 21 日, 25 日至 27 日, 8 月 1 日和 3 日, 期间 7 月 22 日、28 日和 8 月 4 日进行了灌水。分析其平均土壤水分含量及地温的变化规律, 结果如下:

525 mm 灌溉处理土壤含水率明显高于 375 mm, 体积含水率平均相差 3.5% (图 6)。525 mm 灌溉处理灌溉量大, 灌溉水能有效到达膜间, 因此 5 cm 深度膜下与膜间含水率差别不大; 20 cm 深度, 因为膜间没有作物, 蒸腾作用较弱, 所以膜间水分高于膜下, 相差 2.3%。375 mm 灌溉处理的水量较小, 在浅层不能有效到达膜间, 5 cm 深度处膜下与膜间水分状况差别较大; 20 cm 深度处影响因素主要为作物根系吸水, 因此没有作物的膜间土壤水分含量高于膜下, 相差 1.5%。以上所述的土壤含水率分布,



一定程度上影响了地温的变化 (图 7)。

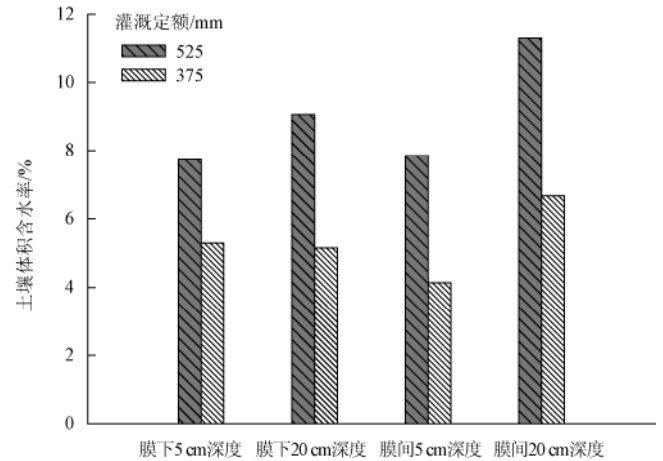


图 6 不同灌溉处理下的平均土壤含水率

Fig.6 Comparison of average soil moisture content for different irrigation schemes

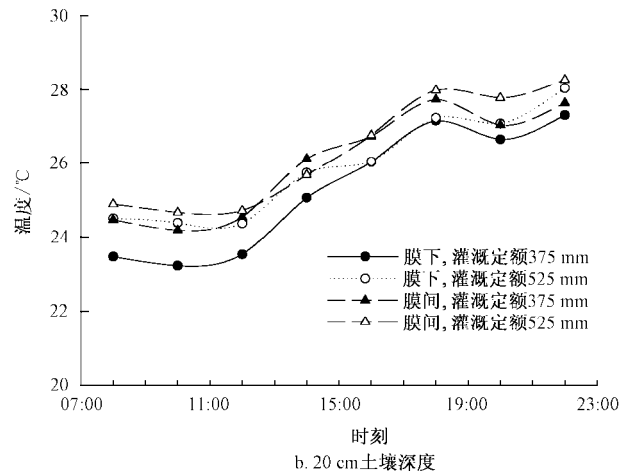


图 7 不同土壤含水率下日内地温分布

Fig.7 Diurnal pattern of soil temperature for different irrigation schemes

正午时候, 阳光直射, 含水率低的土壤升温快, 375 mm 灌溉处理在膜间和膜下 5 cm 深度地温可比 525 mm 分别高 2°C 和 3°C; 而到了夜间, 地温下降, 含水率低的土壤降温快, 375 mm 灌溉处理在膜间和膜下 5 cm 深度地温可比 525 mm 分别低 1°C 和 1.5°C, 一日之内, 二者地温变幅分别相差 3°C 和 5°C (图 7)。较深层 (20 cm) 高含水率土壤的地温波动幅度小, 平均温度高, 525 mm 处理的地温几乎始终高于 375 mm, 膜间和膜下平均温差分别为 0.3°C 和 0.6°C (图 7)。由于土壤水分对土壤热容量和热传导的影响, 其对地温的影响非常明显。

2.5 覆膜对地温变化规律的影响

地膜覆盖改变了土壤的水热耦合特性, 覆膜与不覆膜土壤在滴灌条件下呈现出不同的地温变化特征。利用直角地温计测量 525 mm 灌溉处理下无作物覆盖时有无地膜的地温分布, 对比灌溉前后的地温变化。由于 7 月 28 日、8 月 4 日和 11 日分别进行了灌水, 选取每次灌水

的前一天和后一天分别平均后进行对比。

由于土壤含水率高, 热容量大, 滴灌后地温整体下降了 (图 8)。灌溉前, 土壤整体相对较干, 平均体积含水率仅为 7%, 而无膜土壤蒸发快, 表层土壤含水率更低一些, 土层容易被加热, 因此表层地温较膜下土壤要高, 但在深层, 覆膜土壤水分含量高, 保温效果好, 覆膜的优势体现了出来, 覆膜地温在 20 cm 深度位置平均高于无膜 1°C。灌溉后, 覆膜和无膜的整个土壤层含水率都较高, 平均为 17%, 覆膜切断蒸发, 减少潜热消耗, 起到了很好的保温作用, 由试验结果可以看出, 在各个深度处, 覆膜地温都要高于无膜, 在 25 cm 深度范围内, 平均温差达到了 2°C。因此, 对于无膜土壤, 土壤水分和地温总是存在一定程度上的矛盾, 或是高地温低含水率, 或是低地温高含水率, 而无法同时达到较好的水热状况。利用覆膜可以有效克服这一矛盾, 创造较好的水热条件, 促进作物的生长。

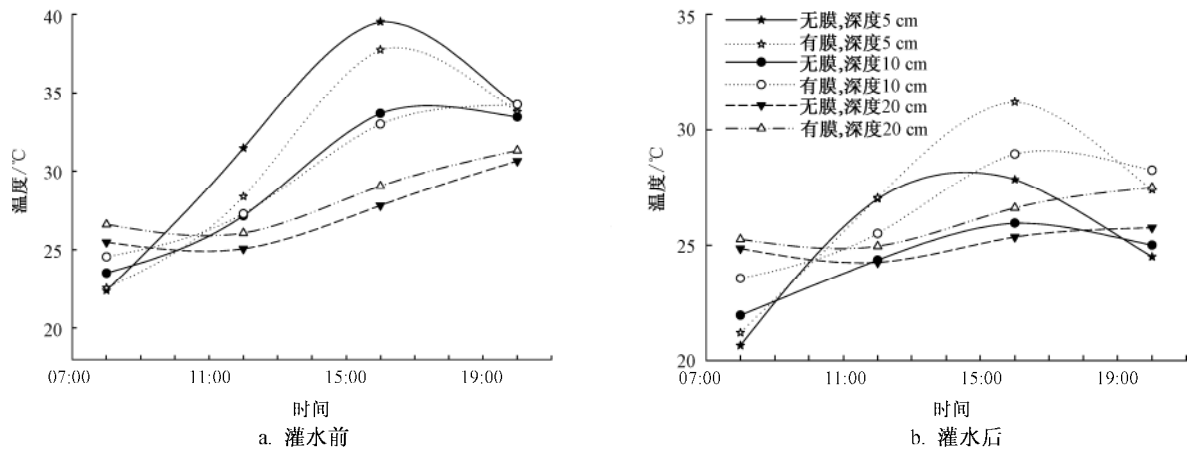


图 8 525 mm 灌溉定额条件下有无膜地温日内变化图

Fig.8 Diurnal pattern of soil temperature for mulched/un-mulched cases (irrigation volume 525 mm)

3 结论与讨论

膜下滴灌条件下, 土壤水热呈现出特殊的时间和空间分布, 气象条件、土壤水分、地膜和棉株覆盖 4 个因素作用于棉花生长的不同阶段, 形成了地温随生育期变化和分布的不同规律。出苗期由于覆膜作用, 宽行间和窄行间地温高于膜间, 膜下与膜间在这一阶段温差可以达到 4~5℃, 平均温差为 1.6℃, 该阶段由于没有灌溉, 宽行间和窄行间地温差别并不明显; 从蕾期到花铃期, 由于作物覆盖的遮荫作用及土壤含水率高等原因, 宽行间和窄行间地温低于膜间, 而宽行间土壤含水率大于窄行间, 因此宽行间地温低于窄行间; 进入吐絮期, 气温降低导致平均地温大幅下降, 同时, 灌溉水量减少, 且作物生长接近末期, 膜间已被作物枝叶覆盖, 宽行间、窄行间和膜间地温的差别逐渐缩小; 在整个生育期内, 作物逐渐生长形成覆盖后, 其遮荫效果大大降低了地温。由于在不同阶段发挥主导作用的因素不同, 地温的时空分布在生育期出现了上述差异。以上现象表明, 地膜覆盖在出苗期发挥了重要的增温作用, 可以有效保障作物出苗; 在生育期的后几个阶段, 覆膜的增温功能因作物覆盖逐渐丧失; 与此同时, 作物冠层可以避免阳光直射土壤, 降低土壤水分蒸发, 一定程度上代替地膜的保墒作用。综上, 由于地膜在生育期后期的增温保墒作用减弱, 可采取揭膜的措施, 一方面增大土壤的透气性, 加强根系的呼吸作用, 另一方面促进根系下扎, 防止后期早衰。部分新疆农户已经在生产实践中采用了作物覆盖形成后揭膜的做法。但对于该问题的定量描述, 还要在未来的试验中进一步加以研究。

土壤中水分与温度相互影响, 不同的土壤含水率下地温变化存在差异: 阳光直射下含水率低的土壤升温快, 到了夜间, 地温下降, 含水率低的土壤降温快。土壤的水分含量显著影响地温变化的同时, 地膜覆盖也改变了土壤的水热耦合特性: 无膜浅层土壤在灌溉前含水率低, 地温高; 但在深层, 地温受太阳辐射直接影响小, 覆膜土壤水分含量高, 地膜保温效果好, 覆膜土壤地温在

20 cm 深度平均高于无膜 1℃; 灌溉后, 覆膜和无膜处理的整个土壤层含水率都提高了, 平均体积含水率达 17%, 覆膜切断蒸发, 减少潜热消耗, 起到了很好的保温作用, 在土壤的各个深度, 覆膜地温都要高于无膜, 在 25 cm 深度范围内平均地温差达 2℃。地膜覆盖有效的缓解了高地温低含水率或低地温高含水率的矛盾, 使土壤达到了较好的水热状况, 但是, 覆膜条件下依然需要协调好土壤水热之间的关系: 覆膜之后, 地膜有效阻断水分蒸发, 减少潜热消耗, 从这个角度上说, 土壤水分含量越高, 覆膜增温效应越明显; 但水的热容量大, 高含水率土壤升高相同温度相对于低含水率土壤要吸收更多的能量, 从这个角度看, 水分含量高的土壤地温会偏低。作物生长的各个阶段对土壤水分和地温的要求并不相同, 地温的影响控制条件也有差异, 因此需要结合变化规律, 寻找关键因素, 协调优化土壤的水热状况, 进行综合调控, 最大程度地创造利于作物生长的环境, 获得最优的效益。

对于田间地温变化规律和水热相互作用的进一步研究, 需要从能量平衡及多孔介质的水热转移机理入手, 借助计算机进行水热耦合转移的数值模拟, 开展更加系统和深入的分析研究。同时, 在模型的研究和开发中, 要加强对作物部分的刻画, 模拟作物生长对土壤水热状况的响应与反馈, 从而更好的指导下膜下滴灌条件下的农业生产实践。本研究中获得的数据及结论, 将为未来的数值模型的开发及模拟等研究工作提供数据支持及经验基础。

志谢: 感谢新疆巴州水管处灌溉试验站人员对试验开展提供的帮助!

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Zhang Wei, Lü Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):

- 15—19. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李敏, 李毅, 曹伟, 等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1210—1218.
Li Min, Li Yi, Cao Wei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1210—1218. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 42—46.
Ma Donghao, Wang Quanjiu, Lai Jianbin. Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何雨江, 汪丙国, 王在敏, 等. 棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 14—20.
He Yujiang, Wang Bingguo, Wang Zaimin, et al. Study on irrigation scheduling of cotton under mulch drip irrigation with brackish water [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 14—20. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 45—48.
Cai Huanjie, Shao Guangcheng, Zhang Zhenhua. Lateral layout of drip irrigation under plastic mulch for Cotton [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王春霞, 王全九, 刘建军, 等. 滴灌施钾肥土壤水盐分布特征的田间试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 25—31.
Wang Chunxia, Wang Quanjiu, Liu Jianjun, et al. Field trial for characteristics of soil water and salt distribution in drip fertigation of kalium-using fertilizers [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 25—31.
- [7] 王荣堂, 王有宁, 董秀荣. 地膜覆盖棉花、玉米、大豆生育盛期的降温效应[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1667—1672.
Wang Rongtang, Wang Youning, Dong Xiurong. Effects of plastic film covering on dropping ground temperature at the full-growing stages of cotton, maize and soybean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1667—1672. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉制度的试验研究[J]. 水利学报, 2002(11): 119—123.
Cai Huanjie, Shao Guangcheng, Zhang Zhenhua. Water demand and irrigation scheduling of drip irrigation for cotton under plastic mulch [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(11): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李毅, 邵明安. 新疆农田作物覆膜地温极值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2039—2044.
Li Yi, Shao Ming'an. Spatial and temporal variation of soil temperature extremum under plastic mulch in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2039—2044. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李毅, 王文焰, 门旗, 等. 宽地膜覆盖条件下土壤温度场特征[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 32—36.
Li Yi, Wang Wenyan, Meng Qi, et al. Field characters of soil temperature under the wide plastic-mulch [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [11] 胡晓棠, 李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 121—123.
Hu Xiaotang, Li Mingsi. Effects of trickle irrigation under sub film on the soil conditions of rhizosphere in cotton [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 121—123. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张朝勇, 蔡焕杰. 膜下滴灌棉花土壤温度的动态变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 11—15.
Zhang Chaoyong, Cai Huanjie. Dynamic patterns of soil temperature in the drip irrigation underneath mulching film [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [13] 胡晓棠, 张旺锋. 膜下滴灌条件下棉株温湿度微环境[J]. 中国农业气象, 2005, 26(4): 259—262.
Hu Xiaotang, Zhang Wangfeng. Study on micro-environment of temperature and moisture on cotton (*Gossypium hirsutum*. L.) under drip irrigation mulched with plastic film [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(4): 259—262. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李明思, 康绍忠, 杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 49—54.
Li Mingsi, Kang Shaozhong, Yang Haimei. Effects of plastic film mulch on the soil wetting pattern, water consumption and growth of cotton under drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [15] 塔依尔, 吕新, 马兰花, 等. 膜下滴灌棉田潜热和感热通量分配特征分析[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(2): 162—164.
Tayir, Lü Xin, Ma Lanhua, et al. Study on character of latent heat and sensible heat flux of cotton field with drip irrigation under film mulch in oasis [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2006, 45(2): 162—164. (in Chinese with English abstract)
- [16] 慕彩芸, 马富裕, 郑旭荣, 等. 覆膜滴灌棉田蒸散量的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 25—29.
Mu Caiyun, Ma Fuyu, Zheng Xurong, et al. Simulation of evapotranspiration under the condition of drip irrigation with plastic film mulching in cotton field [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(4): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [17] Mahrer Y. Temperature and moisture regimes in Soils mulched with transparent polyethylene [J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, 48(2): 362—367.
- [18] 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[J]. 水利学报, 2000(11): 89—96.
Wu Conglin, Huang Jiasheng, Shen Rongkai. A model of heat and water flow in SPAC under transparent polyethylene

- mulch [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(11): 89—96. (in Chinese with English abstract)
- [19] Wu C L, Chau K W, Huang J S. Modelling coupled water and heat transport in a soil-mulch-plant-atmosphere continuum (SMPAC) system [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(2): 152—169.
- [20] 王建东, 龚时宏, 马晓鹏, 等. 地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证[J]. *水利学报*, 2010, 41(3): 368—378. Wang Jiandong, Gong Shihong, Ma Xiaopeng, et al. Verification and application of mathematical model for simulating water flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(3): 368—378. (in Chinese with English abstract)
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2008)[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [22] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 25—27. Xu Feipeng, Li Yunkai, Ren Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [23] 高龙, 田富强, 倪广恒, 等. 膜下滴灌棉田土壤水盐分布特征及灌溉制度试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1158—1165. Gao Long, Tian Fuqiang, Ni Guangheng, et al. Experimental research on soil water and salt movement and irrigation scheduling for cotton under mulched drip irrigation condition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1158-1165. (in Chinese with English abstract)

Spatial and Temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang

Zhang Zhi, Tian Fuqiang^{*}, Zhong Ruisen, Hu Heping

(State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Temperate soil heat condition, together with suitable soil moisture condition, is of critical importance for crop growth. Film covering is a beneficial agronomic measure and changes the soil temperature dynamics significantly. To quantify such influences in the hyper-arid area, field experiments were implemented in Xinjiang Province in 2008 and 2009. Soil moisture and temperature time series data were obtained for different irrigation and agronomy treatments. The results indicated that: the spatial pattern of soil temperature along the horizontal direction would depend on the combinational influence of meteorological, growing, soil moisture, and mulching conditions. Soil temperature in the intra-film location was 1.6°C higher than that in the inter-film location at 15cm depth in the seedling phase. The inter-film temperature exceeded the intra-film temperature in the bud phase and flowering phase, while the two temperatures collapsed together in the blooming of boll phase. Soil moisture and heat movements were intimately coupled. The amplitude of soil temperature with high soil moisture condition was small due to its big heat capacity. The average mulched soil temperature within 25cm depth was 2°C higher than the bare soil temperature after irrigation under the same moisture condition. The experiment showed that the mulched drip irrigation can provide more suitable soil moisture and heat conditions for cotton growth.

Key words: irrigation, cotton, temperature, soil moisture, soil temperature, hyper-arid area, mulched drip irrigation