

灌水梯度及覆膜组合模式对 滴灌棉田蒸散规律的影响

刘承岳^{1,2}, 杨广^{1,2}, 郭明华³, 贾伟康³, 孔春贤^{1,2}, 王春霞^{1,2},
何新林^{1,2}, 张硕^{1,2}, 赵丽^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 蒲胜海⁴

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子 832003; 2.寒旱区生态水利工程兵团重点实验室,新疆石河子 832003;
3.石河子市水利工程管理服务服务中心,新疆石河子 832000; 4.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所/
农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室,新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:为研究地膜覆盖与灌水对棉田蒸散量及水热状况的影响,开展测坑和桶栽试验,设置三个灌水水平:3 360(W1)、4 200(W2)、5 040 m³·hm⁻²(W3);两种地膜覆盖方式:覆膜(P1)和裸土(P2)。结果表明:(1)覆膜能有效降低棉花全生育期总蒸散量,W1、W2、W3灌溉水平下,覆膜处理棉花蒸散量分别降低25.31%、25.39%、25.75%。灌水量与蒸散量呈正相关关系,P1方式下,W3处理比W1、W2处理棉花蒸散量分别提高8.71%、7.50%;P2方式下,W3处理比W1、W2处理棉花蒸散量分别提高8.82%、8.02%。(2)覆膜能改变棉田土壤水热状况,可有效提高土壤温度和土壤含水率,覆膜对土壤水热状况的影响随土壤深度的增加而减弱;土壤温度与灌水量呈负相关关系,土壤含水率与灌水量呈正相关关系。(3)土壤含水率对裸土处理棉花蒸散量的相关系数影响最大,并随着土层深度的增加而降低;土壤温度对棉花蒸散量的相关系数随土层深度增加而升高,P1处理在20 cm土层相关系数最高,P2处理则在25 cm土层最高。探索覆膜滴灌对干旱区农田蒸散过程的影响对理解绿洲水文循环过程具有重要的理论意义,同时也可作为干旱区有限水资源合理利用提供科学参考。

关键词:棉花;滴灌;覆膜;蒸散发;土壤含水率;土壤温度

中图分类号:S271; S275.6 **文献标志码:**A

Effects of irrigation gradients and film mulching combinations on evapotranspiration in drip-irrigated cotton field

LIU Chengyue^{1,2}, YANG Guang^{1,2}, GUO Minghua³, JIA Weikang³,
KONG Chunxian^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2}, HE Xinlin^{1,2}, ZHANG Shuo^{1,2},
ZHAO Li^{1,2}, LI Pengfei^{1,2}, PU Shenghai⁴

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
2. Key Laboratory of Cold and Arid Regions Eco-Hydraulic Engineering of Xinjiang Production & Construction Corps,
Shihezi, Xinjiang 832003, China; 3. Water Conservancy Project Management and Service Center of Shihezi,
Shihezi, Xinjiang 832000, China; 4. Research Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water
Conversation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in
Northwest Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: To examine the effects of plastic film coverage and irrigation on evapotranspiration as well as water and heat conditions in cotton fields, pit and barrel planting experiments were conducted. The experiments involved three irrigation levels: 3 360 m³·hm⁻²(W1), 4 200 m³·hm⁻²(W2), and 5 040 m³·hm⁻²(W3), along with two plastic film covering methods: covered with film (P1) and bare soil (P2). The evapotranspiration pattern and soil water and heat status of drip irrigated cotton fields were analyzed. The results showed that: (1) Plastic film

收稿日期:2024-03-25

修回日期:2024-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52269006);新疆生产建设兵团科技项目(2022BC001,2022DB023,2023AB059);石河子市科技计划项目(2023NY01);第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0804);农业科技创新稳定支持项目(xjnkjwdzc-2023005-6);国家重点研发计划项目(2021YFD1900803)

作者简介:刘承岳(1999-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为水资源高效利用技术。E-mail:13609929398@163.com

通信作者:杨广(1983-),男,河北新乐人,教授,主要从事水资源高效利用技术研究。E-mail:mikeyork@163.com

mulching effectively reduced the total evapotranspiration of cotton throughout the entire growth period. Under W1, W2, and W3 irrigation levels, the plastic film mulching treatment reduced cotton evapotranspiration by 25.31%, 25.39%, and 25.75%, respectively. The irrigation amount was positively correlated with evapotranspiration. Under P1 mode, the cotton evapotranspiration of W3 treatment increased by 8.71% and 7.50% compared to W1 and W2 treatments, respectively. Under P2 mode, the cotton evapotranspiration of W3 treatment increased by 8.82% and 8.02%, respectively. (2) Film mulching had a considerable impact on the soil temperature and moisture content of the cotton fields, leading to an increase in soil temperature and moisture content. However, the impact of film mulching on soil water and thermal conditions diminished as soil depth increased. Additionally, there was a negative correlation between soil temperature and irrigation amount, and a positive correlation between soil moisture content and irrigation amount. (3) Soil moisture content was found to have the greatest influence on the correlation coefficient of cotton evapotranspiration in the bare soil treatment, and it decreased with increasing soil depth. On the other hand, the correlation coefficient of soil temperature on cotton evapotranspiration increased with soil depth. It is worth noting that the P1 treatment had the highest correlation coefficient in the 20 cm soil layer, while the P2 treatment had the highest correlation coefficient in the 25 cm soil layer. Exploring the impact of film mulching and drip irrigation on the evapotranspiration process of farmland under water-saving conditions in arid regions is of great theoretical significance. This research helps in understanding the hydrological cycle and stability mechanisms of oases. Additionally, it provides valuable scientific insights for optimizing and utilizing limited water resources in arid areas.

Keywords: cotton; drip irrigation; mulching; evapotranspiration; soil moisture; soil temperature

蒸散发是地球陆面水循环活动中最主要的水文过程之一,是联系植被以及土壤与大气间关系的重要生态过程^[1],是正确评价农田水分状况、科学确定农田灌溉定额的关键依据,也是水资源评价和区域水资源供需平衡计算不可缺少的基础参数^[2],对研究水循环及陆地生态系统水文过程至关重要。蒸散发是农田水循环过程中水分损失的主要途径,与降水量共同影响干旱程度,干旱区有90%以上的陆地降水通过蒸散方式重新回到大气中^[3]。新疆位于西北干旱地区,蒸发强烈、降雨稀少,多年平均降水量约160 mm、蒸发量约3 000 mm,农业生产受水分环境限制明显^[4-5]。棉花是新疆主要经济作物之一,2023年新疆棉花产量511.2万t,约占全国产量的91%,已成为我国最大的优质棉花生产基地^[6]。膜下滴灌技术将覆膜栽培技术与滴灌技术相结合,具有保温保墒、节水节肥、增产抑盐、减少深层渗漏等优点,可有效缓解水资源不足与农业用水利用率不高的矛盾,在新疆棉区得以广泛应用^[7]。在农业节水背景下,实行农业节水措施会导致土壤在一定阶段内受到不同程度的干旱,作物蒸散发规律也会与充分灌溉时不同。由于作物生态系统中最为活跃的土壤水分因素的改变,土壤温度等其他环境因素及其生态作用发生变化^[8]。土壤水热状况作为棉花生长发育的重要因子,对蒸发蒸腾的影响尤为突出。当土壤含水量或土壤温度处于某一阈值内时,棉花自身会对生长环境产生一定的

适应性变化^[9],从而进一步影响农田水循环过程。研究膜下滴灌条件下绿洲农田作物蒸散发规律将有利于提高作物水分利用效率,精确规划灌溉额度,避免农业生产中过量灌溉和水分亏缺^[10]。

覆膜滴灌技术在地膜和滴灌的综合效应下,作物生长与常规条件下不同,土壤水分入渗及蒸散发过程也必然发生变化^[11]。国内外对覆膜与蒸散相关性的研究较多,Chen等^[12]利用双作物系数法研究种植密度和地膜覆盖对玉米不同生育期蒸散量的影响,表明地膜覆盖条件下玉米蒸腾量随种植密度增加而增大,但不覆盖处理则有所减少。Kanani等^[13]在伊朗半干旱区研究覆膜和裸土条件下多孔膜灌溉、地表滴灌和地下滴灌对玉米实际蒸散量的影响,对比发现覆膜多孔膜灌溉能有效提高作物产量;刘延雪等^[3]利用大型称重式蒸渗仪观测滴灌棉田蒸散发,并对不同覆膜条件下棉花蒸散量与气象因子的相关性进行了研究,表明蒸散发与风速、辐射、气温呈正相关关系,与湿度和气压呈负相关关系。Ding等^[14]对我国黄土高原地区不同覆膜处理下农田蒸散发进行了探究,表明膜下滴灌在有效减少土壤蒸发的同时能极大地促进作物蒸腾。现阶段国内外研究更多地侧重于单一要素下作物不同生长阶段蒸散发的变化特征,但是关于覆膜及覆膜与灌水交互作用对滴灌棉田蒸散量贡献率与机理的研究不够深入,结合多方面因素探索出覆膜对农田水循环产生的影响成为农田作物研究的首要任务。

基于此,本文采用田间试验与称量式蒸渗桶结合的方式,对多因素作用下棉花各阶段蒸散量进行定量分析,研究不同灌水量和地膜覆盖对棉花蒸散特性以及水热特性的影响,以期探索覆膜对蒸散这一重要水循环要素的影响,为研究规模化覆膜滴灌技术条件下农田蒸散过程响应机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2023 年 4—9 月在现代节水灌溉兵团重点实验室进行,试验地位于石河子市西郊石河子大学试验场(85°59'47"E,44°19'28"N,海拔 412 m),地面平均坡度为 0.6%。平均年日照时数 2 865 h,多年平均降雨量 198 mm,多年平均蒸发量 1 340 mm,大于 10℃ 积温 3 463.5℃,无霜期 170 d,年平均风速 1.5 m·s⁻¹。试验站内安装的自动气象站自动记录降雨和气温状况(图 1)。

1.2 试验设计

开展测坑试验与桶栽试验,测坑试验每组 6 个测坑,设有 1 个对照组和 2 个重复组。测坑规格为 2 m×2 m×2 m,底部设 30 cm 反滤层,四周侧壁进行防渗处理;供试土壤为砂壤土,平均容重为 1.46 g·cm⁻³,田间持水率为 19.13%(质量含水率);灌水方式为覆膜滴灌和裸土滴灌,滴灌带布置方式为一膜二管四行,棉花种植宽窄行间距分别为 60、30 cm,株距 10 cm;滴灌带选用单翼迷宫式滴灌带,规格为 Φ16,滴头间距 30 cm,滴头布置于距作物的基径约 5 cm 处,滴头额定流量 3 L·h⁻¹,额定工作压力为

0.1 MPa;施肥、喷施农药及其他农艺措施均按当地常规标准实施。桶栽试验共 18 个桶,规格为 30 cm×27 cm×30 cm(上底×下底×高),试验桶四周包裹保温棉及隔热锡纸;灌水方式为覆膜滴灌和裸土滴灌,采用滴灌袋滴灌,滴头布置于距作物的基径约 5 cm 处,滴头流量用流速阀控制与测坑相同。棉花测坑试验与桶栽试验灌溉与施肥制度均相同,灌水量设置 3 360(W1)、4 200(W2)、5 040 m³·hm⁻²(W3),各处理 3 次重复,在棉花每个生育期进行一次取土,同时采集取土点附近的植物样品,并对灌溉水进行取样。具体灌溉制度如表 1 所示。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 蒸散发 每 3 d 于 10:00 用高精度电子秤对试验桶称重,计算不同处理蒸散发量,两次重量之差即为 3 d 蒸散量。采用自记录式计重秤测定不同天气下棉花蒸腾量日变化。在棉花进入花铃期后,选取日期较近的晴天、阴天和雨天,将蒸渗桶置于计重秤上,计重秤每小时自动记录一次重量数据,换算得到单位时间内棉花蒸散量变化数据。

1.3.2 土壤水分 在播种前、收获后及每个生育期测量一次土壤含水率,采集测坑滴头处和膜间处 20、40、60、80、100 cm 深度土壤,用烘干称重法测得土壤含水率,每个测点取样 3 次取其平均值。

1.3.3 土壤温度 采用地温计测量 5、10、15、20、25 cm 土层温度,观测时间为 10:00,每 3 d 观测一次,大气温度由试验站自动气象站实时监测。

1.4 数据统计与分析

采用 Origin 9.0 和 SPSS 20.0 对试验数据进行绘图和方差分析,并通过 $P < 0.05$ 水平下的最小显著性差异法计算不同处理之间的显著性。

表 1 2023 年棉花测坑与桶栽试验水肥处理

Table 1 Irrigation and fertilizer treatment for cotton pit and barrel planting experiments in 2023

生育期 Growth period	灌溉次序 Irrigation order	灌水量 Irrigation quantity /(m ³ ·hm ⁻²)	N/kg	P, K/kg	
苗期 Seedling	1	420	0	0	
	蕾期 Bud	2	336	2	0.56
		3	336	3	0.84
		4	420	5	1.4
		5	420	4	2.8
		6	420	5	2.1
花铃期 Bolling	7	420	5	2.1	
	8	420	2	2.8	
	9	420	2	1.4	
吐絮期 Boll opening	10	294	0	0	
	11	294	0	0	

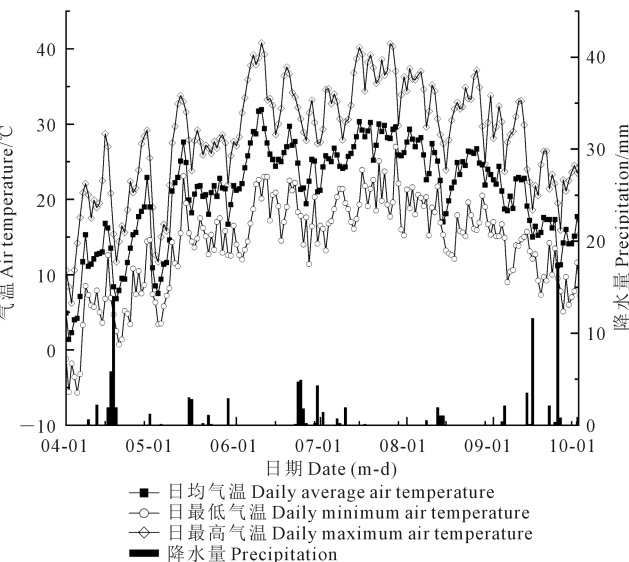


图 1 2023 年棉花全生育期降水量和气温

Fig.1 Precipitation and temperature throughout the entire cotton growth period in 2023

2 结果与分析

2.1 棉花蒸腾特征

2.1.1 棉花蒸散发日变化 如图 2 所示, 全生育期棉花总蒸散量随灌水量的增加而增加, 相同覆膜条件下, P1W3 处理比 P1W1、P1W2 处理分别提高 16.86%、7.50%, P2W3 处理比 P2W1、P2W2 分别提高 17.55%、8.02%; 在相同灌水量条件下, 裸土处理蒸散量均高于覆膜处理, P2W1、P2W2、P2W3 处理分别比 P1W1、P1W2、P1W3 处理提高 33.89%、34.03%、34.68%。综合全生育期总体变化趋势来看, 各处理蒸散量变化趋势基本相同, 棉花总蒸散量与灌水量成正相关关系, 地膜覆盖能有效降低棉花总蒸散量。

由表 2 可知, 各处理棉花全生育期蒸散强度与耗水模数均表现为花铃期>蕾期>吐絮期>苗期, 表明棉花在花铃期需要大量水分才能满足其生长需求, 高灌溉水量可以促进棉花花铃期的生长发育。P2W2 处理苗期、蕾期、花铃期、吐絮期的蒸散强度分别比 P1W2 处理提高 63.64%、33.12%、26.41%、56.04%,

覆膜对棉花各生育期蒸散强度均有显著影响。P1W3 处理棉花苗期蒸散强度比 P1W1、P1W2 处理分别提高 26.1%、10.51%, 蕾期分别提高 18.01%、7.87%, 花铃期分别提高 13.85%、5.99%, 吐絮期分别提高 25.35%、12.56%, 灌水对棉花各生育期蒸散强度均有显著影响。相同灌水量下, 裸土处理苗期、蕾期与吐絮期耗水模数均高于覆膜处理, 而花铃期耗水模数均低于覆膜处理, 表明覆膜处理在降低蒸散强度的同时, 提高了棉花在花铃期水分吸收的效率, 有利于棉花生长发育, 从而提高棉花将光合物质转化为产量的能力。

2.1.2 不同天气条件下棉花蒸散变化 选取三种典型天气条件(晴天、阴天、雨天)对棉花蒸散量进行分析, 以 2023 年 8 月 3 日、8 月 7 日、8 月 8 日三天为例, 从图 3 可以看出, 晴天与阴天情况下棉花在生长期的蒸腾累积量呈 S 形曲线, S 形曲线分别在凌晨和傍晚有两条渐近线, 蒸腾日累积量增速较缓, 曲线斜率趋近于零, 蒸腾变化较小; 晴天条件下 P1W2、P2W2 处理棉花日蒸腾量分别为 234.67、332.94 g, P2W2 处理比 P1W2 处理提高 41.87%, 覆膜对晴天时棉花蒸散发有显著抑制作用, 这可能是因为晴天时气温高, 太阳辐射强度大导致土壤蒸发强度高, 而覆膜减少土壤与大气之间的热交换, 能较大限度地抑制土壤蒸发; 阴天条件下 P1W2、P2W2 处理棉花日蒸腾量分别为 174.50、241.04 g, P2W2 处理比 P1W2 处理提高 38.13%; 雨天条件下 P1W2、P2W2 处理棉花日蒸腾量分别为 82.16、93.57 g, P2W2 处理比 P1W2 处理提高 13.88%, 由于雨天时全天降雨, 有效辐射低且相对湿度较大, 棉花日蒸腾累积量趋近于直线, 白天与夜间相比变化不大。由此可见, 不同天气条件下, 棉花蒸腾存在显著差异, 且覆膜对不同天气条件下棉花蒸腾的影响呈现出晴天>阴天>雨天。

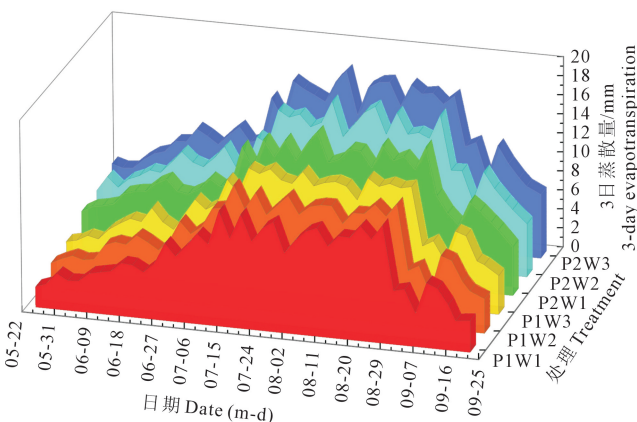


图 2 各处理棉花全生育期 3 日蒸散量

Fig.2 3-day evapotranspiration of cotton throughout the entire cotton growth period of each treatment

表 2 不同处理棉花各生育期蒸散强度与耗水模数

Table 2 Evapotranspiration intensity and water consumption modulus of cotton at different growth stages under different treatments

处理 Treatment	总蒸散量 Total evapotranspiration /mm	总蒸散强度 Total evapotranspiration intensity /(mm · d ⁻¹)	蒸散强度 Evapotranspiration intensity/(mm · d ⁻¹)				耗水模数 Water consumption modulus/%			
			苗期 Seedling	蕾期 Bud	花铃期 Bolling	吐絮期 Boll opening	苗期 Seedling	蕾期 Bud	花铃期 Bolling	吐絮期 Boll opening
P1W1	299.95	2.04	1.05	1.98	3.49	1.63	6.28	17.84	62.84	13.04
P1W2	326.07	2.23	1.20	2.17	3.75	1.81	6.60	17.96	62.09	13.35
P1W3	350.53	2.42	1.32	2.34	3.97	2.04	6.78	18.02	61.22	13.98
P2W1	401.60	2.85	1.83	2.67	4.35	2.57	8.19	17.98	58.48	15.34
P2W2	437.03	3.10	1.96	2.89	4.74	2.83	8.05	17.83	58.57	15.55
P2W3	472.10	3.33	1.99	3.10	5.16	3.08	7.60	17.75	59.00	15.65

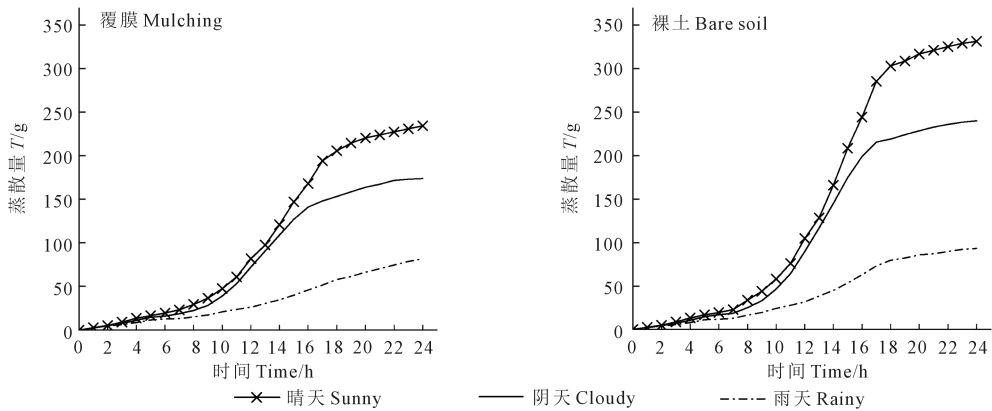


图 3 棉花在不同天气状况下的累积蒸腾量日变化动态

Fig.3 Cumulative transpiration of cotton under different weather conditions

2.2 棉田土壤水热效应及其与蒸腾蒸散的关系

2.2.1 土壤温度 土壤温度是农田水文循环中的重要参数,棉花全生育期土壤温度变化如图 4 所示。覆膜对土壤温度有显著影响,其中 5 cm 土层变化幅度最大,在相同灌水梯度下,P1W1、P2W2、P3W3 处理分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理提高 10.22%、6.57%、5.92%;25 cm 土层变化幅度最小,在相同灌水梯度下,P1W1、P2W2、P3W3 处理分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理提高 3.36%、2.07%、2.96%,覆膜对土壤温度的作用随土层深度的增加而减弱。在覆膜处理下,5 cm 土层 P1W1 处理分别比 P1W2、P1W3 处理提高 6.07%、2.65%,土壤温度变化幅度最大;在裸土处理下,25 cm 土层 P1W1 处理分别比 P1W2、P1W3 处理提高 0.41%、2.36%,土壤温度变化幅度最小。土壤温度随着灌水量的增长而降低,灌水量与土壤温度呈负相关关系。

2.2.2 土壤水分 各生育期棉花根区土壤含水量分布如图 5 所示,不同覆膜及灌水处理间差异显著,覆膜处理土壤含水率在各个土层均明显高于裸土处理。除 P1W3 处理外,各处理土壤水分均集中在 40~60 cm 土层,P1W3 处理土壤水分集中在 60~80 cm 土层,表明在高灌溉水平覆膜滴灌下,随着土壤含水量的增加,土壤湿润层深度显著增加。

苗期是棉花生长发育初期,棉花根部较短,生育活动不明显,主要影响表层土壤,在相同灌水梯度下,0~20 cm 土层 P1W1、P1W2、P1W3 处理土壤含水率分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理提高 16.35%、17.64%、12.01%;随着生育期的进行,蕾期棉花根部进一步生长,主要影响 0~40 cm 土层土壤含水率,20 cm 与 40 cm 土层含水量差距减小,各处理间土壤含水率波动幅度较大。P1W1、P1W2、P1W3 处理土壤含水率分别比 P2W1、P2W2、P2W3

处理提高 19.31%、11.38%、12.98%。花铃期土壤耗水量激增,棉花根区土壤水分运动剧烈,因根系吸水作用,土壤水分集中于 0~60 cm 土层,灌溉量的增加也使土壤含水量达到峰值,此阶段棉花生长最为旺盛,大面积叶片对光辐射起到遮蔽作用,导致裸土处理土壤含水率也处于较高水平,覆膜与裸土处理之间差距变小,但不同灌水梯度处理之间变化差距更大。不同覆膜条件下,60 cm 土层 P1W1、P1W2、P1W3 处理土壤含水率分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理提高 4.63%、5.33%、6.23%;不同灌水梯度下,60 cm 土层 P1W1 处理分别比 P1W2、P1W3 处理降低 3.55%、3.91%,P2W1 处理分别比 P2W2、P2W3 处理降低 2.93%、3.08%。吐絮期棉花逐渐停止生长发育,对水分的需求降低,故灌溉量降低,土壤含水率随之逐渐下降。各处理间 60 cm 土层土壤含水量变化不大,P1W1、P1W2、P1W3 处理土壤含水率分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理提高 5.38%、6.63%、7.95%。由此可见,覆膜对不同生育期土壤含水率变化的影响程度也不同,W2 处理下,覆膜分别提高棉花各生育期土壤含水率 12.66%、11.57%、5.66%、8.85%,土壤含水率对覆膜的响应程度表现为苗期>蕾期>吐絮期>花铃期。综上,覆膜主要影响了前期土壤含水率变化,尤其是 0~60 cm 土层,且土壤含水率随灌水量的增加明显增加,覆膜对浅层土壤含水量较小的处理具有明显的提高作用,对深层土壤的影响程度较弱。

2.2.3 土壤水热状况对棉花蒸散影响 土壤水热状况是影响作物蒸散的关键因素,对不同灌水量覆膜滴灌棉花全生育期蒸散与土壤水热状况进行相关性分析发现(表 3、4),各处理水热状况对蒸散的影响程度在不同土层存在显著差异。随着土层深度增加,P1 处理土壤含水率对棉花蒸散的影响程度

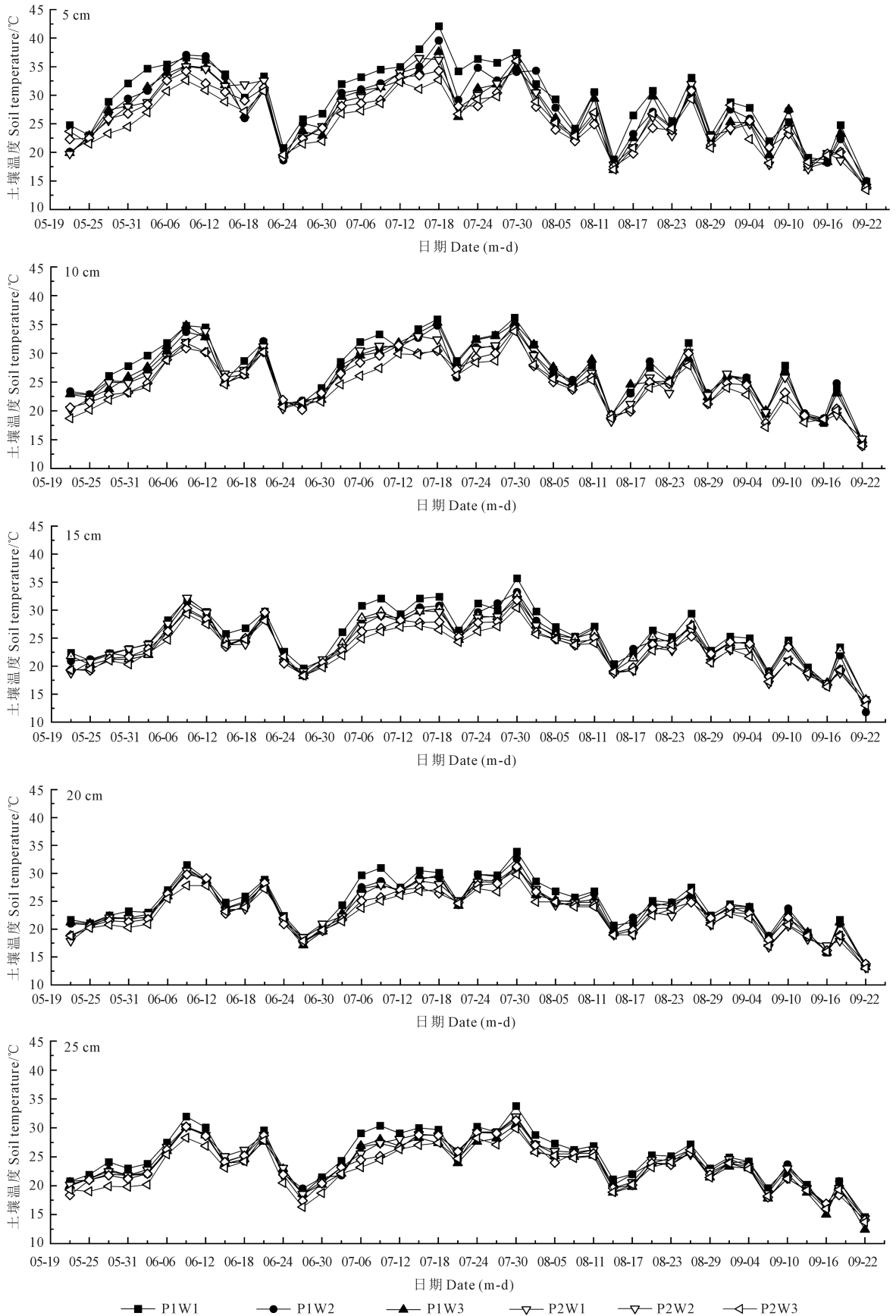


图4 不同处理 5~25 cm 土层平均土壤温度日际变化

Fig.4 Diurnal variation of average soil temperature in 5~25 cm layers of different treatments

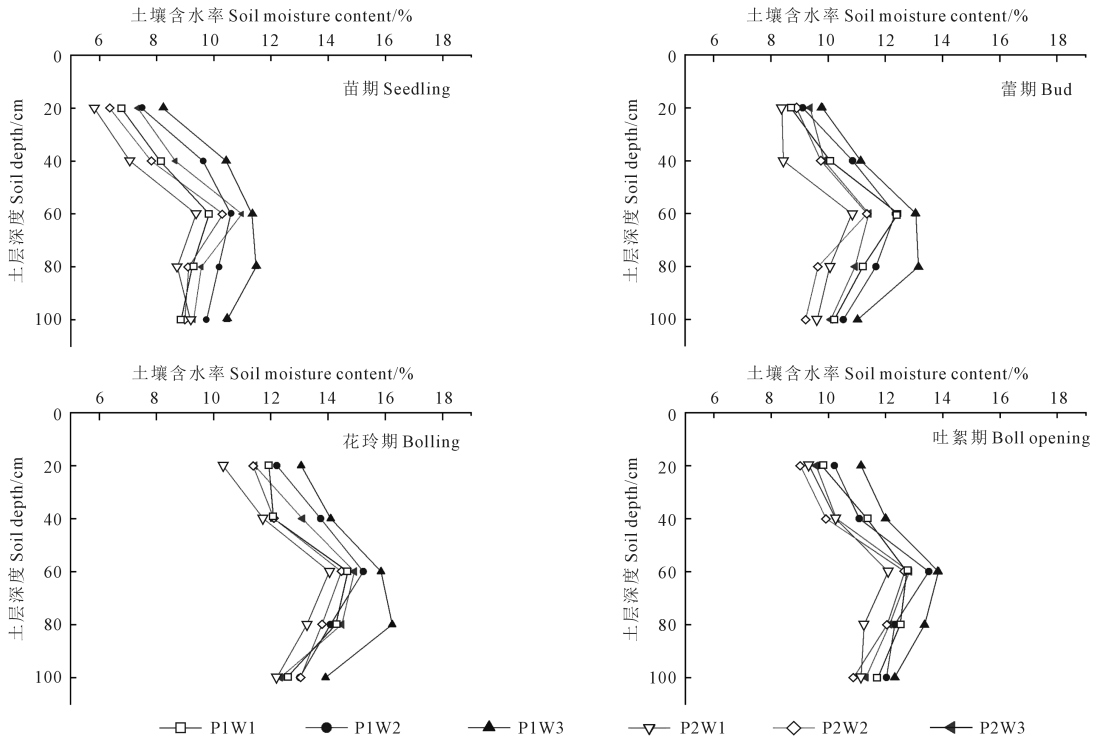


图 5 不同处理棉花各生育期 0~100 cm 土层土壤含水率变化

Fig.5 Changes in soil moisture content of 0~100 cm layers at different growth stages of different treatments

降低,且在 80 cm 土层处相关性达到最低,此时 P1W1、P1W2、P1W3 处理土壤含水率与蒸散量之间的相关系数分别 0.655、0.622、0.557, P1W3 处理土壤含水率与棉花蒸散量之间无显著相关关系。P2 处理在 100 cm 土层处相关性达到最低, P2W1、P2W2、P2W3 处理土壤含水率与蒸散量之间的相关系数分别为 0.676、0.664、0.684。综合 0~100 cm 土层深度来看, P2W2 处理土壤含水率与蒸散量相关性最大 ($r = 0.885$)、P2W3 处理次之 ($r = 0.877$)、P1W3 处理最小 ($r = 0.769$)。由此可见,因覆膜在提高土壤含水率的同时能够降低土壤蒸发,极大改变了棉花的蒸散过程,在 P1 处理下,相关系数与灌水量呈负相关关系;在 P2 处理下,棉田蒸散发强烈且无其它因素影响,相关系数与灌水量呈正相关关系,土壤含水率对 P2 处理棉花蒸散量的影响程度更大。

各处理土壤温度在 5 cm 土层处与蒸散量均无显著相关性,土壤温度对棉花蒸散量的影响程度随土层深度增加而增强, P1W1、P1W2、P1W3、P2W1、P2W2、P2W3 处理的相关系数分别在 20、25、15、25、25、25 cm 土层最高。综合 0~100 cm 土层深度来看, P1W2 处理土壤温度与蒸散量相关性最大 ($r = 0.477$)、P1W3 处理次之 ($r = 0.342$)、P2W2 处理最小 ($r = 0.313$)。因此,土壤温度对覆膜与不同灌水量处理棉花蒸散量的影响程度无显著差异。

表 3 棉花蒸散量与各土层土壤含水率的相关分析

Table 3 Correlation analysis between cotton evapotranspiration and soil moisture in different soil layers

土层深度 Soil depth /cm	P1W1	P1W2	P1W3	P2W1	P2W2	P2W3
0~20	0.852**	0.839**	0.839**	0.848**	0.922**	0.928**
20~40	0.826**	0.768**	0.811**	0.869**	0.873**	0.885**
40~60	0.740**	0.751*	0.712*	0.824**	0.855**	0.860**
60~80	0.655*	0.622*	0.557	0.716*	0.751*	0.766*
80~100	0.686*	0.628*	0.641*	0.676*	0.664*	0.684*
0~100	0.801**	0.789**	0.769**	0.837**	0.885**	0.877**

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), 下同。

Note: * indicates significant differences ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), the same below.

表 4 棉花蒸散量与各土层土壤温度的相关分析

Table 4 Correlation analysis between cotton evapotranspiration and soil temperature in different soil layers

土层深度 Soil depth /cm	P1W1	P1W2	P1W3	P2W1	P2W2	P2W3
5	0.183	0.200	0.155	0.187	0.097	0.207
10	0.232	0.342*	0.318*	0.303	0.273	0.288
15	0.382*	0.444**	0.442**	0.324*	0.340*	0.345*
20	0.383*	0.428**	0.435**	0.367*	0.370*	0.374*
25	0.372*	0.483**	0.372*	0.404**	0.393*	0.456**
平均 Average	0.314*	0.394*	0.342*	0.331*	0.313*	0.339*

3 讨论

覆膜滴灌技术改变了棉田土壤表面蒸散发、土壤水热条件和土壤微环境,影响着降雨入渗、作物蒸散发及产汇流等各个环节,与完全不受人工干扰的自然水循环过程存在显著不同^[15-16]。因此,研究覆膜对棉田蒸散的影响对研究人工干预下农田水文循环具有重要意义。本研究表明,覆膜能有效降低棉田蒸散量,且覆膜在不同生育期对棉田蒸散的抑制作用不同,这与以往研究结果类似^[7,17]。苗期棉花蒸散作用弱,棉田蒸散发主要表现为表层土壤蒸发,覆膜对蒸散的抑制作用随着灌水量的增加而降低,覆膜对蒸散的影响在全生育期中最为显著^[18]。蕾期棉花快速生长,棉花蒸散作用增强,覆膜和灌水量对棉田蒸散的影响均有减弱。花铃期棉花蒸散强度达到最大,土壤蒸发与棉花蒸腾作用强烈,但此时覆膜对棉花蒸散的影响最小,P1W1、P1W2、P1W3 处理分别比 P2W1、P2W2、P2W3 处理降低 19.75%、20.89%、22.96%,随着灌水量的增加,覆膜对棉田蒸散的影响也更为显著。这说明应合理调控覆膜滴灌棉花在花铃期的灌水量,避免过度灌溉产生水分无效损耗^[19]。在不同天气情况下,覆膜对花铃期棉田蒸散的抑制作用也不同^[20],在晴天条件下,覆膜对棉田蒸散的抑制作用更为突出,阴天次之,这与周珊珊^[21]的研究结果一致。吐絮期棉花逐渐停止生长发育,棉花蒸腾作用开始降低,新疆地区这一时期处于夏季转变为秋季,气温降低并且湿度增加的阶段,所以表面土壤蒸发也有所降低^[22]。这一阶段灌水量对棉花蒸散的影响逐渐增加,这可能是因为棉花在生长后期对水分的需求减少,过高的灌溉量易造成水分无效损耗,导致灌水量对棉花蒸散的影响增强^[23-24]。从棉花全生育期总蒸散发来看,覆膜与灌水量之间存在显著的交互作用,随着灌水量的增加,覆膜对不同生育期阶段棉田蒸散的影响程度表现为吐絮期>苗期>蕾期>花铃期。

土壤水热条件是影响棉花生长发育和产量形成的重要因素^[25],本研究表明覆膜及灌水量对土壤水热情况有显著影响。覆膜主要影响表层土壤水热状况,对土壤温度及土壤含水率的影响随土层深度的增加而降低;灌水量则与土壤温度呈负相关、与土壤含水率呈正相关关系,这与 Hunsaker 等^[26]研究一致。土壤温度影响土壤微生物活动与土壤蒸发强度,土壤含水率则影响作物生长的水分环境与蒸发蒸腾耗水情况^[27],研究土壤水热状况与蒸散

这一农田水文循环要素的相关关系有利于探寻覆膜对农田水文循环的影响。表层土壤含水率与蒸散相关性最高,在土壤深度 100 cm 时各处理基本已无显著相关性,且土壤含水率对裸土处理棉花蒸散量的影响程度最大。分析认为,一方面是覆膜降低了土壤蒸发,使土壤蒸发与叶面蒸腾之间的耗水比例改变^[28];另一方面,覆膜促进棉花生长,在降低棉花蒸散量的同时使农田耗水量增加^[29],进而改变土壤含水率对蒸散的影响程度。土壤温度在表层土壤处与蒸散均无显著相关关系,土壤温度与蒸散量的相关性随土壤深度的增加而增加,其中,覆膜处理在 20 cm 处平均相关系数最大、裸土处理在 25 cm 处最大。这是因为地膜覆盖的增温保墒作用使覆膜处理土壤在较浅土层能达到适宜棉花生长的温度,从而使覆膜处理下较浅层土壤对蒸散的影响程度更显著^[30]。土壤水热变化会显著影响作物蒸发蒸腾量,本文对作物蒸散规律与土壤水热状况的研究将有助于深入学习土壤-植物-大气连续体系统,为作物抗旱栽培以及田间水分管理提供理论依据,同时也可优化利用干旱区有限水资源提供科学参考。未来研究可注重于多年田间试验进行验证以及细化研究时段,对大跨度时尺度蒸散规律进行研究,以期引发更多对水热条件与蒸散关系的探讨。

4 结论

1) 覆膜能有效减少棉花全生育期总蒸散量与蒸散强度,中等灌溉水平下覆膜滴灌棉花总蒸散量为 326.07 mm,裸地滴灌棉花总蒸散量为 437.03 mm,覆膜降低了棉花 25.39% 的蒸散量。棉花全生育期总蒸散量随灌水量增加而增加,蒸散量与灌水量呈正相关关系,覆膜能降低灌水量对棉花的蒸散量的影响。

2) 棉花蒸散量在不同天气条件下存在显著差异,其中降雨对蒸散具有极大的制约作用。覆膜可削弱天气条件对棉花蒸散的影响,在不同天气条件下,覆膜对棉花蒸散的影响程度表现为晴天>阴天>雨天。

3) 覆膜改变了棉田土壤的水热状况,能有效提高土壤温度和土壤含水率,对土壤水热状况的影响随土壤深度的增加而降低。土壤含水率与灌水量呈正相关关系、土壤温度与灌水量呈负相关关系。土壤含水率对裸土处理棉花蒸散量的影响程度最大,并随着土层深度的增加而降低,且在 100 cm 土层处相关性达到最低。土壤温度对棉花蒸散量的影响程度随土层深度增加而增强,P1 处理在 20 cm

土层处相关系数最高, P2 处理则在 25 cm 土层处最高。

参考文献:

- [1] 赵文智, 吉喜斌, 刘鹤. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散研究展望[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 463-470.
ZHAO W Z, JI X B, LIU G. Progresses in evapotranspiration research and prospect in desert oasis evapotranspiration research[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 463-470.
- [2] 马金龙, 刘丽娟, 李小明, 等. 干旱区绿洲膜下滴灌棉花蒸散过程[J]. 生态学报, 2015, 34(4): 974-981.
MA J L, LIU L J, LI X Y, et al. Evapotranspiration process of cotton field under mulched drip irrigation of oasis in arid region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 974-981.
- [3] 刘延雪, 乔长录. 干旱区绿洲膜下滴灌棉花蒸散发[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 152-162.
LIU Y X, QIAO C L. Study on evapotranspiration of cotton field under drip irrigation in oasis of arid region[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 152-162.
- [4] 姚俊强. 新疆空中水资源和地表水资源变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 181-190.
YAO J Q. Change in atmospheric and surface water resource in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 181-190.
- [5] 陈雨, 章启兵, 吕海深, 等. 基于 SPEI 指数的淮北地区气象干旱时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 67-77.
CHEN Y, ZHANG Q B, LV H S, et al. Calculating spatiotemporal variation in droughts in the Huaibei area using the precipitation-evapotranspiration index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 67-77.
- [6] 王洪博, 李国辉, 徐雪雯, 等. 基于 AquaCrop 模型评估气候变化下棉花生产的可持续性[J]. 中国农业气象, 2023, 44(7): 588-598.
WANG H B, LI G H, XU X W, et al. Assessing the sustainability of cotton production under climate change based on the AquaCrop model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(7): 588-598.
- [7] 李万精, 杨广, 雷杰, 等. 不同矿化度(微)咸水膜下滴灌棉花土壤水盐分布及棉花生长特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 95-103.
LI W J, YANG G, LEI J, et al. Soil water and salt distribution and cotton growth under film drip irrigation with different water salinity in cotton field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 95-103.
- [8] 赵泽欢. 夏玉米蒸发蒸腾量及生长过程对土壤含水量的响应机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHAO Z H. Study on the response mechanism of evapotranspiration and growth process of summer maize to soil moisture content[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [9] 董智强, 李曼华, 李楠, 等. 山东夏玉米土壤干旱阈值研究与影响评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4376-4387.
DONG Z Q, LI M H, LI N, et al. The thresholds of soil drought and its impacts on summer maize in Shandong province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(21): 4376-4387.
- [10] 耿耘, 刘浩, 李云峰, 等. 麦后移栽棉蒸发蒸腾规律和作物系数[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 24-34.
GENG Y, LIU H, LI Y F, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of transplanted cotton after wheat harvest[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 24-34.
- [11] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.
YANG G, LI W J, REN F T, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 73-83.
- [12] CHEN Z J, SUN S J, ZHU Z C, et al. Assessing the effects of plant density and plastic film mulch on maize evaporation and transpiration using dual crop coefficient approach[J]. Agricultural Water Management, 2019, 225: 105765.
- [13] KANANI E, DEHGHANISANI H, AKHAVAN S. Variation in actual corn (*Zea mays* L.) evapotranspiration, single, and dual crop coefficient under different point source irrigation systems in a semiarid region[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 148(1): 303-315.
- [14] DING D A, ZHAO Y, FENG H, et al. Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 246-257.
- [15] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖沙柳河流域蒸发时空间变化特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 358-372.
KANG L G, CAO S K, CAO G C, et al. Temporal and spatial changes of evapotranspiration in the Shaliu river basin of Qinghai lake[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 358-372.
- [16] 赵晓涵, 张方敏, 韩典辰, 等. 内蒙古半干旱区蒸散特征及归因分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1614-1623.
ZHAO X H, ZHANG F M, HAN D C, et al. Characteristics and attribution analysis of evapotranspiration in semi-arid areas of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1614-1623.
- [17] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116.
WU Y J, DU T S. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 110-116.
- [18] 张淑霞. 于田绿洲地表蒸散发与土壤水盐关系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
ZHANG S X. Study on the relationship between surface evapotranspiration and soil water and salt in Yutian Oasis[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [19] 哈丽代姆·居麦. 膜下滴灌棉花生境调控下蒸散发特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
HALIDAIMU J M. Study on evapotranspiration and crop coefficient under the control of cotton habitat under drip irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [20] GUL N, HAFIZ A, ASHRAF M. Potential impacts of climate change using long-term historical climate data on evapotranspiration (ET) and groundwater contribution to wheat and cotton crop[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2023, 13(7): 142-159.