

翻耕深度对膜下滴灌棉花生长和冠层小气候的影响

陈文娟¹, 胡晓棠², 李清林³, 韩 寒³, 张锦华³

(1.石河子大学理学院,新疆 石河子 832000;2.石河子大学农学院,新疆 石河子 832000;
3.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003)

摘 要:为探究翻耕深度对覆膜滴灌农田小气候及棉花生长的影响机制,于 2019 年 4—10 月在新疆库尔勒地区开展田间试验,设置 20、30、40 cm 3 组翻耕深度处理(T20、T30、T40),以免耕处理(NT)作为对照,分析了翻耕深度对土壤孔隙率、农田耗水量、田间小气候、棉花生长状况及产量的影响。结果表明:翻耕深度的增加能够有效提高土壤孔隙率、增加膜内耕层土壤温度、促进植株耗水;棉株从膜内土壤中消耗的水分对冠层小气候的调控作用大于膜外土壤的水分蒸发对冠层小气候的调控作用,NT、T20、T30、T40 处理膜内位置的农田耗水量分别是膜外位置农田耗水量的 2.48、2.52、3.08、3.47 倍;全生育期内,T20、T30、T40 处理的农田耗水量分别是 NT 处理的 1.30、1.42、1.52 倍;深翻导致农田耗水量的增加能够有效提高冠层湿度,延长棉花生育期,使棉花增产。全生育期内,各翻耕处理(T20、T30、T40)的近地表平均冠层湿度分别比 NT 处理高 12.83%、14.49%、17.55%,棉花全生育期分别比 NT 处理长 10、16、23 d,籽棉产量分别比 NT 处理高 670.68、1 252.67、1 584.02 kg·hm⁻²。

关键词:棉花;膜下滴灌;翻耕深度;生长;冠层;田间小气候

中图分类号:S562;S162.4;S341.1 **文献标志码:**A

Effects of tillage depth on cotton growth and canopy microclimate under mulched drip irrigation

CHEN Wenjuan¹, HU Xiaotang², LI Qinglin³, HAN Han³, ZHANG Jinhua³

(1. College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

3. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To explore the effect of tillage depth on microclimate and cotton growth under mulched drip irrigation, field trials in Korla of Xinjiang, China carried out from April to October 2019. Three tillage depths of 20 cm, 30 cm, 40 cm (T20, T30, T40) and no tillage (NT) as a control were set up. The effects of tillage depth on soil porosity, farmland water consumption, field microclimate, cotton growth and cotton yield were analyzed. The results showed that the increase of tillage depth effectively increased soil temperature of inner-membrane tillage layer and promoted plant water consumption. The controlling effect of the water consumed by cotton plants from the soil in the membrane on the canopy microclimate was greater than that of the soil water evaporation outside the membrane on the canopy microclimate. The total farmland water consumption in NT, T20, T30 and T40 treatments in the membrane was 2.48, 2.52, 3.08 and 3.47 times of that outside the membrane, respectively. During the full cotton growth period, the total farmland water consumption of T20, T30 and T40 treatments was 1.30, 1.42 and 1.52 times than that of the NT treatment, respectively. The increase of farmland water consumption caused by deep tillage effectively increased the canopy humidity, prolonged cotton growth period and increased cotton yield. During the whole growth period, the average canopy humidity near soil surface of tillage treatments (T20, T30, T40) was

12.38%, 14.49% and 17.50% higher than that of NT treatment, respectively, and the whole growth period of cotton were 10d, 16d, 23d longer than the NT treatment, respectively. The cotton yield was $670.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1\,252.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1\,584.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than those of NT treatment. The results of this study are of great significance for understanding the mechanism of tillage measures to improve cotton yield in Xinjiang, China.

Keywords: cotton; mulched drip irrigation; tillage depth; growth; canopy; field microclimate

新疆地区广泛采用膜下滴灌技术进行棉花种植,以达到节水增产的目的;同时,每年秋季(或春季)都对农田土壤进行翻耕作业,以获得熟化土壤、减少虫害、抑制土壤返盐或蓄水保墒的效果。这两项技术或措施使新疆棉花产量明显提高^[1],有研究表明,翻耕深度的增加对提高棉花产量也有促进作用^[2]。棉花增产除了与合理的土壤水分状况有关以外,还与田间小气候状况有关,分析棉田小气候随翻耕深度变化的关系,对认识棉花生长条件及其调控原理很有帮助。

田间小气候环境对作物生长的影响已得到学术界的共识,适宜的环境湿度有助于植株生长。目前,学者们在农田小气候方面的研究大都侧重于农作物生长发育、产量形成及产量预测等指标与气候要素之间的关系问题上。李润丰^[3]通过对番茄的生长环境进行加湿处理,发现空气湿度较高的处理番茄叶面积指数、根重、产量及干物质累积等都明显高于空气湿度较低的处理。娄善伟等^[4]对不同种植密度的棉田小气候情况进行了观测;任锋潇等^[5]对不同冠层结构的棉田小气候情况进行了分析。另外,有学者从翻耕措施调节土壤水盐状态的角度对棉花增产的机理做了研究^[1,6-7],发现翻耕措施可调节土壤结构,翻耕深度加深可延长棉花生育周期、提高棉花产量。可以看出,翻耕措施和小气候调节都对作物增产有积极作用;但是翻耕深度对田间小气候的调节作用相关研究较少。

农田小气候通过土壤及周围环境的温度、湿度变化进行调节;而土壤及作物冠层温度、湿度是由土壤-植物-大气连通体内的热量和水汽运动共同决定的,它既能反映作物与大气之间的能量交换,也是影响作物产量的重要因素^[8]。犁底层的存在会阻碍耕作层与心土层之间的水、肥、气、热连通性,延长水分入渗时间^[9-10];深翻能够打破土壤犁底层,增加灌溉水分入渗量^[11],提高耕层土壤液相所占比例,减少土壤水分向水平方向扩散的量^[12-13],提高水分利用效率^[14],促进根系生长^[15]。膜下滴灌条件下,农田膜外土壤棵间蒸发量减少,膜内土壤虽然有地膜覆盖,仍能接受太阳的短波辐射,但

却难以向大气进行长波漫射,从而避免了土壤降温,使土温升高^[16],有利于作物根系耗水。由于农田膜外土壤含水量较少,冠层湿度只能依靠叶片气孔腾发进行补充,此时土壤的储水能力对冠层小气候的影响更加重要。所以膜下滴灌技术对田间作物小气候的调控途径与传统种植模式下的调控途径不同。

新疆棉花是一种高密度种植作物,植株间冠层小气候的温度、湿度受冠层外环境温度、土壤水热气等多因素的影响;同时株间冠层小气候的温度、湿度也是植株水分状况的间接反映。所以认识翻耕深度对棉花冠层小气候的影响,有利于从农田生态角度揭示深翻措施引起棉花增产的原因。本研究结果对认识翻耕深度促进棉花增产的机理有重要意义,对发展新疆棉花高产技术有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 4—10 月在新疆库尔勒市普惠农场($85^{\circ}52'E$, $41^{\circ}25'N$, 海拔高度 880 m)进行,该区位于天山南麓塔里木盆地东北边缘,属孔雀河冲击平原带,暖温带大陆荒漠气候,常年干旱少雨、蒸发强烈,年日照时数可达 3 000 h。试验期间测得总降雨量为 69 mm;农田环境温度及大气湿度指标见图 1。试验地土壤为沙性壤土,田间持水率(质量含水率) 28.67%,0~100 cm 土层土壤盐分含量为 $2.96 \sim 8.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;棉花种植品种为新陆中系列,灌溉方式为膜下滴灌。生育期地下水平均埋深 2.45 m。

1.2 试验设计

试验区总面积约 960.48 m^2 ,共分 4 个试验小区,各试验区面积均为 240 m^2 。春耕时设置 3 种翻耕深度处理,分别为 20(T20)、30(T30)、40(T40) cm,以免耕处理(NT)作为对照,每个处理分别设置 3 组重复。对于 T20、T30、T40 处理,采用传统犁铧进行春耕,春耕后耙平进行棉花种植。NT 处理的农田不春耕,而是直接种植棉花。试验期间,对各处理的农田均进行 8 次灌水,灌溉定额均为 475 mm,具体灌溉方案见表 1。

试验棉田均于 2019 年 4 月 16 日播种,7 月 5 日对棉花统一进行打顶,9 月上旬开始采摘。期间喷洒农药控制病虫害。根据当地棉花种植及灌溉模式,采用“一膜一管四行”的宽窄行模式进行栽培与灌溉,土壤表面覆膜宽度均为 115 cm,膜间裸地宽

度 30 cm,膜内棉花宽行间距、窄行间距分别为 55、25 cm(图 2),株距 10 cm,种植密度约 24.01 万株·hm⁻²。单翼迷宫式滴灌带铺设于膜下宽行中间位置进行灌水,滴灌带内径 16 mm,滴头间距 30 cm,滴头设计流量 2.2 L·h⁻¹。

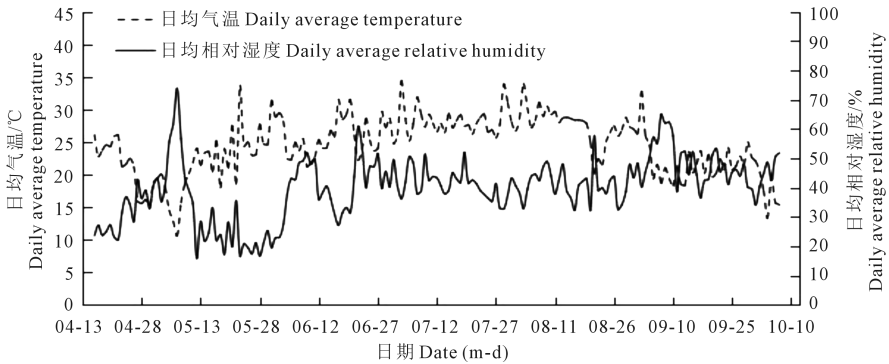


图 1 试验期间大气温度与湿度变化

Fig.1 Variation of atmospheric temperature and humidity during the test period

表 1 棉花生育期灌溉制度

Table 1 Irrigation schedule of cotton during growth period

项目 Item	灌溉次数 Irrigation number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
灌溉时间 Irrigation time (m-d)	06-19	06-30	07-09	07-19	07-29	08-08	08-17	08-26
灌水定额 Irrigation quota/mm	55	60	60	60	60	60	60	60
灌溉比例 Irrigation proportion/%	11.58	12.63	12.63	12.63	12.63	12.63	12.63	12.63

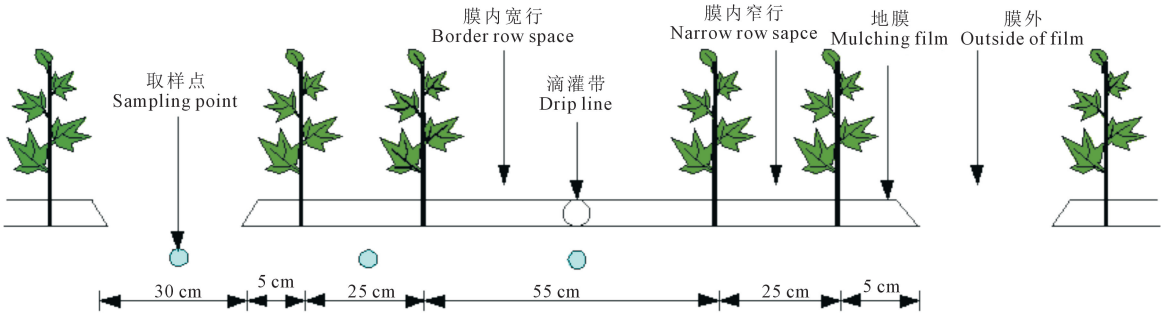


图 2 棉花、滴灌管、地膜配置模式示意图及取样点位置分布

Fig.2 The cotton, drip irrigation pipe, film pattern and sampling point location distribution

1.3 测定指标及测定方法

(1)土壤容重的测定。环刀法测定土壤容重,播种后于每月中、下旬用环刀(体积 100 cm³)测定不同翻耕深度处理下膜内位置 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm 等 6 个土层的土壤容重。每个土层设置 3 组重复,加权平均值作为最终的有效数据。

(2)土壤温度及植株冠层温度、湿度的测定。

试验期间采用自动气象站(中科正奇科技有限公司)监测棉花冠层上部(距地面 2 m)大气环境温度和湿度。曲管地温计在膜内棉花宽行测定不同翻耕深度处理下的土壤温度,测定深度分别为 5、10、15 cm 及 20 cm。空气温、湿度计测定不同翻耕深度处理的棉花植株近地表冠层温度及湿度;由于不同翻耕深度处理的棉花株高及冠幅不同,为了便于比较观测结果,统一在各处理的棉花宽行(株间)冠层

内的下部测温、湿度。为尽量减少人为活动对棉花生长的干扰,分时段测定棉花株间冠层温度、湿度;测定时段分别选为苗期(06-01—06-02)、蕾期(06-24—06-25)以及花铃期(07-17—07-18、07-21—07-22);其中,花铃期的冠层温、湿度观测分别是在灌水前、后实施;每次连续观测 48 h,每隔 2h 读取一次数据。

(3)土壤含水率的测定及耗水量的计算。干燥法测定土壤含水率。试验期间,在每次灌水前后分别于膜内宽行、膜内窄行及膜间裸地 3 个位置用土钻采取土壤样品,取样深度分别为 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm,具体取样点分布见图 2。土样放置在 105℃ 的鼓风干燥箱中烘干,然后计算相应土层的土壤质量含水率值。利用土壤质量含水率计算单位面积耕层深度土壤含水量的公式为:

$$m = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i \times H_i \times \theta_i \tag{1}$$

式中, m 为耕层土壤含水量(mm), n 为耕层取样层数, γ_i 为第 i 层土壤干容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H_i 为第 i 层土壤厚度(cm), θ_i 为第 i 层土壤在计算时段的土壤质量含水率(%)。

作物生育期内的耗水量由水量平衡公式计算^[17]。

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i \times H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P + K + C \tag{2}$$

式中, ET_{1-2} 为计算时段内耗水量(mm), θ_{i1} 、 θ_{i2} 为第 i 层土壤在计算时段始末的土壤质量含水率(%), M 、 P 、 K 、 C 分别为阶段内灌水量、降雨量、地下水补给量和排水量(mm)。

由于计算时段内未进行灌水,不会产生深层渗漏,地下水对土壤水的补给均可忽略,且新疆南疆地区蒸发强度大,单次降雨量较小,几乎对土壤含水率不产生直接影响,故(2)式可简化为:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i \times H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) \tag{3}$$

(4)棉花生长状况调查。在各处理的试验小区内选取长势均匀且具有代表性的区域定 3 个测点,每个测点选取 10 株棉花(内、外行各 5 株),每个处理共计 30 株棉花。在棉花铃期(8 月中旬)测定株高、茎粗、果枝数、铃数等指标。各指标所得数据的算数平均值作为最终的有效数据。

(5)棉花籽棉产量的计算。棉花进入吐絮期后,在各处理小区随机选取 100 个棉铃采摘棉絮,精度为 0.01 g 的电子天平称量百铃絮重;再根据各处

理的实际棉花有效株占比计算棉花的籽棉理论产量,具体公式为:

$$Y = 0.001c \times g \times \rho \times \xi \tag{4}$$

式中, Y 为籽棉产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), c 为平均单株棉铃数(个 $\cdot$ 株 $^{-1}$), g 为平均单铃絮的质量(g), ρ 为种植密度(株 $\cdot$ hm $^{-2}$), ξ 为有效株占比(%),是单位面积有效株数与种植密度之比。

(6)水分利用效率计算。基于灌水量的水分利用效率(WUE) 计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{10 \times I} \tag{5}$$

式中, Y 为产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), I 为灌水量(mm)。

1.4 数据处理

采用 Origin 2018、Excel 2003、SPSS 20.0 等工具完成相应试验数据分析及作图。

2 结果与分析

2.1 翻耕深度对土壤容重的影响

土壤容重动态在一定程度上反应了翻耕后土壤结构的变化特征,其数值的变化影响着土壤水分运动和热量的传输与转化过程^[18]。由图 3 可以看到,随着棉花生育期的推进,NT 处理的各层土壤容重始终保持在较高的值,翻耕措施降低了耕层土壤容重。生育期内的灌水作用及农田机械作业又使不同翻耕深度处理的各层土壤容重不断增大,至生育期结束后,各处理的土壤容重基本趋于稳定。

受春耕时翻耕深度的影响,春耕后(4 月 18 日)测得不同翻耕深度处理的各土层容重有所差异(图 3a)。NT 处理的土壤容重始终最大,0~60 cm 土层的平均土壤容重为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。翻耕处理(T20、T30、T40)在耕层范围内土壤较为疏松,土壤容重较小,相应的平均土壤容重分别为 1.22 、 1.25 、 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;耕层以下深度的土壤容重则较大,对应的平均土壤容重分别为 1.48 、 1.51 、 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

随着棉花生育期的推进,受灌水及农田机械作业的影响,翻耕处理各层土壤逐渐变密实。5 月中旬测得不同翻耕深度处理的各土层(0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm)土壤容重分别比春耕后增加 4.62%、4.01%、2.30%、2.35%、1.22%、0.27%(图 3b);6 月分别比春耕后增加 7.56%、6.07%、5.22%、4.10%、4.00%、0.91%(图 3c)。进入 6 月中旬之前没有灌水,仅有简单的农田管理活动,但上层土壤容重的变化率仍大于下层土壤。7 月进入棉花花铃期,也是棉花灌水的关键期,深翻处理的土壤容重依然最小;各处理(NT、T20、T30、T40)

下,0~60 cm 土层范围内的平均土壤容重分别为 1.54、1.43、1.41、1.39 g·cm⁻³(图 3d)。8 月观测到的不同翻耕深度处理 20 cm 以下土层的土壤容重已趋于稳定,与 NT 处理相差不大;而 20 cm 以上土层的土壤容重与 NT 处理相比仍存在差异(图 3e)。各翻耕处理(T20、T30、T40)20 cm 以上土层的平均土壤容重分别比 NT 处理低 7.91%、6.51%、6.30%。说明农田管理活动及灌水作用虽然对上层土壤容重的变化产生影响,但下层土壤的密实速度要快于上层土壤。这可能是由于灌水后上层土壤重量增大,对下层土壤产生的压力增加,导致下层土壤逐渐密实。9 月下旬棉花进入吐絮期,不同翻耕深度处理的各土层土壤容重基本相同,上层土壤容重依然比下层小,但差异性比春耕前明显降低(图 3f)。全生育期内,各处理(T20、T30、T40)40 cm 以上土层的平均土壤容重分别比 NT 处理低 7.89%、9.21%、13.33%。

2.2 翻耕深度对农田耗水量的影响

翻耕深度引起土壤容重的变化对作物耗水能力产生影响。在棉花苗期、蕾期、花期及铃期内各选取一次灌水间隔期观测到的土壤含水率,利用式(3)计算出不同翻耕深度处理下膜内及膜外位置的农田耗水量(图 4)。

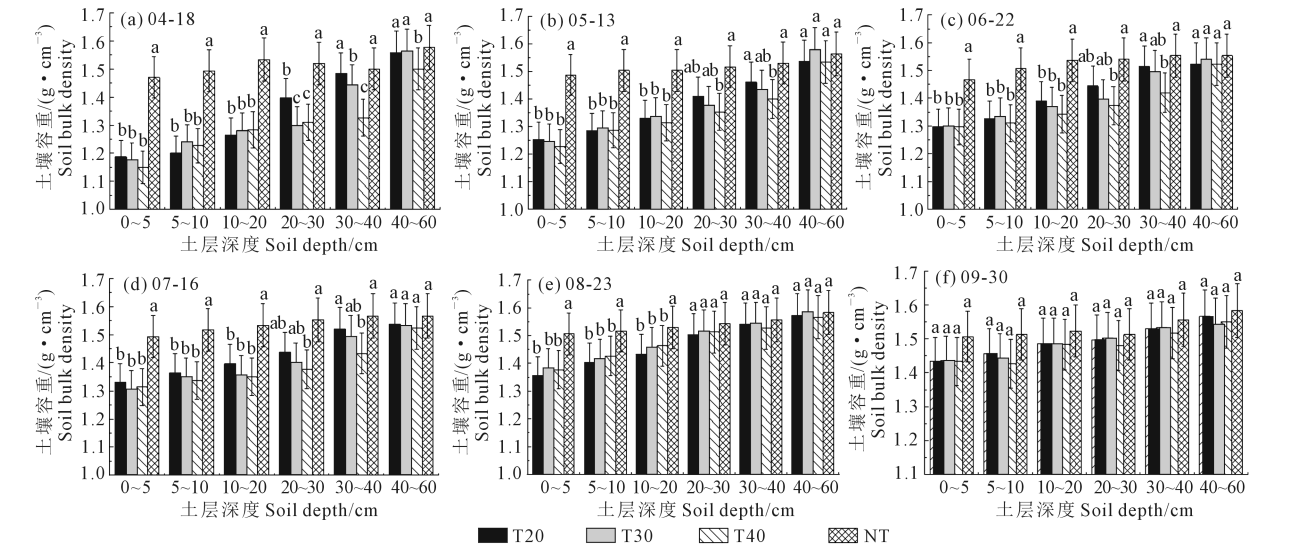
灌水后及下次灌水前土壤含水量的差值可间接反映植株的耗水情况。棉花在不同生育阶段均呈现深翻处理农田耗水量大于浅翻及免耕处理的情况。苗期 T20、T30、T40 处理的膜内、外农田总耗水量分别是 NT 处理的 1.49、1.58、1.62 倍(图 4a),

蕾期对应的数值分别为 1.05、1.18、1.26 倍(图 4b),花期对应的数值分别为 1.44、1.61、1.75 倍(图 4c),铃期对应的数值分别为 1.21、1.33、1.46 倍(图 4d)。对于选取的 4 个生育阶段,T20、T30、T40 处理的农田总耗水量分别是 NT 处理的 1.30、1.42、1.52 倍。

另外,膜内土壤被薄膜覆盖,有效降低了表土蒸发,但不同生育阶段膜内位置的农田耗水量均高于膜外的农田耗水量。苗期各处理(NT、T20、T30、T40)膜内位置的农田耗水量分别是膜外的 2.09、2.21、1.79、1.81 倍,蕾期对应的指标为 2.61、2.75、3.76、4.56 倍,花期对应的指标分别为 2.20、2.72、3.44、4.20 倍,铃期对应的指标分别为 3.02、2.40、3.31、3.32 倍;对于选取的 4 个棉花生育阶段,各处理(NT、T20、T30、T40)膜内位置的农田总耗水量分别是膜外的 2.48、2.52、3.08、3.47 倍。由此可以推测,棉株从膜内土壤中消耗的水分对冠层小气候的调控作用应该大于膜外土壤的水分蒸发对冠层小气候的调控作用。

2.3 翻耕深度对土壤温度的影响

选取棉花苗期(06-01—06-02)的土壤温度为研究对象,发现地温依赖于气温的变化而变化,受大气温度的影响,不同翻耕深度处理的土壤昼夜温度变化基本呈正弦分布。各土层土壤的日间温度变幅均大于夜间,峰值出现的时间随土层深度的增加呈现延迟;受气温影响,靠近地表的土层温度变幅大于下层土壤的温度变幅(图 5)。土壤日积温随翻耕深度的增加也逐渐增大(表 2)。



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$), the same below.

图 3 不同翻耕深度处理下土壤容重
Fig.3 Soil bulk density in different tillage depth

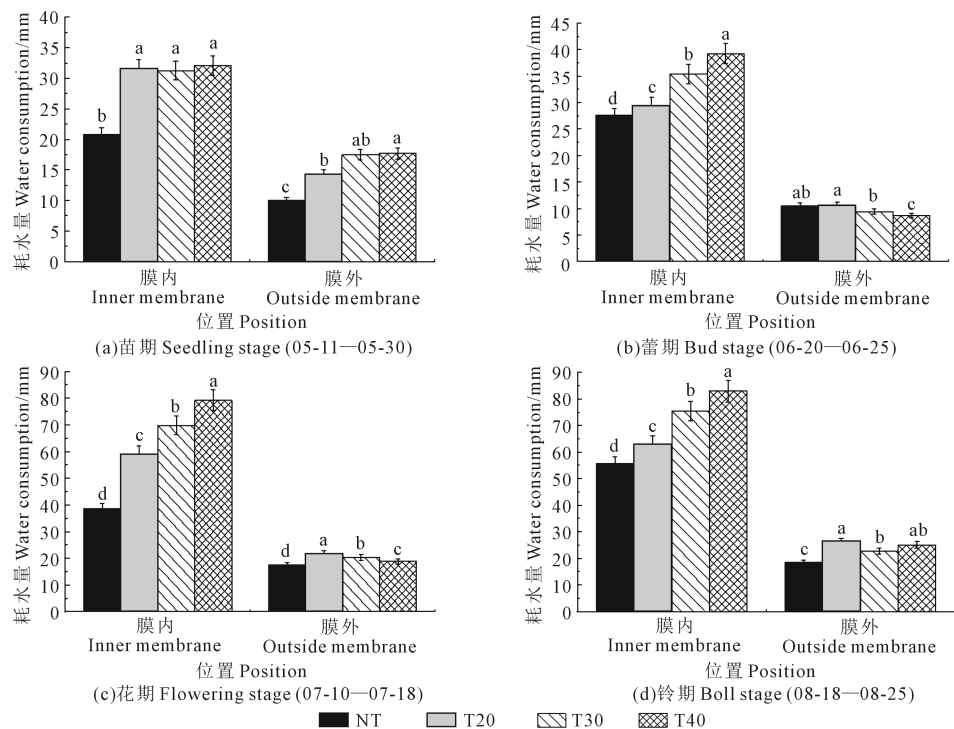


图 4 翻耕深度对棉花不同生育期农田耗水量的影响

Fig.4 Effects of the plowing depth on soil water consumption in different growth stages of cotton

表 2 不同翻耕深度处理土壤日积温/℃

Table 2 Daily accumulated temperature of soil treated with different tillage depth

土层深度/cm Soil depth	NT	T20	T30	T40
5	618.40	663.70	695.60	717.90
10	575.20	640.20	665.90	685.70
15	545.70	603.50	627.60	648.10
20	530.40	576.80	603.20	626.00

土壤温度变化是土壤随太阳辐射和大气温度的变化而吸收和释放能量的过程。但是,膜下滴灌条件下,地膜阻隔了土壤与大气之间的直接热量交换。阳光可以穿过地膜辐射到土壤表面,提高地温;当大气降温时,地膜表面温度降低,使大量水汽在膜内表面凝结^[19],吸收了热量,凝结水渗入表土,导致膜内表土温度低于大气温度(图 5)。观测结果表明,8:00—18:00 为 5~10 cm 土层土壤温度的上升阶段,NT 处理下该土层平均增温 12.95℃(图 5a),各翻耕处理(T20、T30、T40)的相应数值分别为 16.65℃、15.10℃、15.85℃(图 5b、5c、5d)。20:00 至次日 8:00 为 5~10 cm 土层温度的下降阶段;NT 处理下,该土层的平均温度降幅为 10.90℃,各翻耕处理(T20、T30、T40)的相应数值分别为 13.55℃、13.25℃、13.00℃。各处理、各层土壤日间温度的增幅均大于其夜间温度的降幅,总体上,土壤处在增温状态。

对不同翻耕深度处理下的棉花苗期各土层日间温度情况进行分析,发现 NT 处理的各土层日间温差小于各翻耕处理 1.67℃~2.00℃,但是各翻耕处理之间的土层日间温差相差不大。随着翻耕深度的增加,各土层的日均温由 23.06℃~26.53℃ 增加到 25.02℃~28.64℃。日积温也随翻耕深度的增加而增大,T20、T30、T40 处理所对应的 0~20 cm 土层的日总积温量分别比 NT 处理高 214.50℃、322.60℃、408.00℃。

2.4 翻耕深度对棉花株间冠层湿度的影响

大气湿度随温度的变化呈双峰型日变化,规律与温度变化相反。清晨及夜间大气湿度高、温度低,而日间大气湿度低、温度高。棉花株间近地表冠层湿度的变化规律虽然与冠层上部大气湿度的变化规律类似,但是,冠层蒸腾作用及地表蒸发作用使得近地表冠层湿度大于大气湿度(图 6)。

植株的阻力作用可降低冠层内风速,导致冠层内水汽扩散慢,湿度大^[20]。棉花苗期,冠层小且根系浅,地膜表层可直接接受太阳辐射,48 h 内平均地表温度比环境温度高 0.77℃。由于冠层蒸腾量较低,农田土壤也没有进行灌水,所以,测得棉花苗期的株间近地表冠层湿度与冠层上部大气湿度差异不大,且不同翻耕深度处理的近地表冠层湿度差异性也不大(图 6a)。观测期内,大气湿度为 23.83%,NT、T20、T30、T40 处理对应的近地表平均冠层湿度分别为 25.80%、26.08%、25.84%、25.76%。

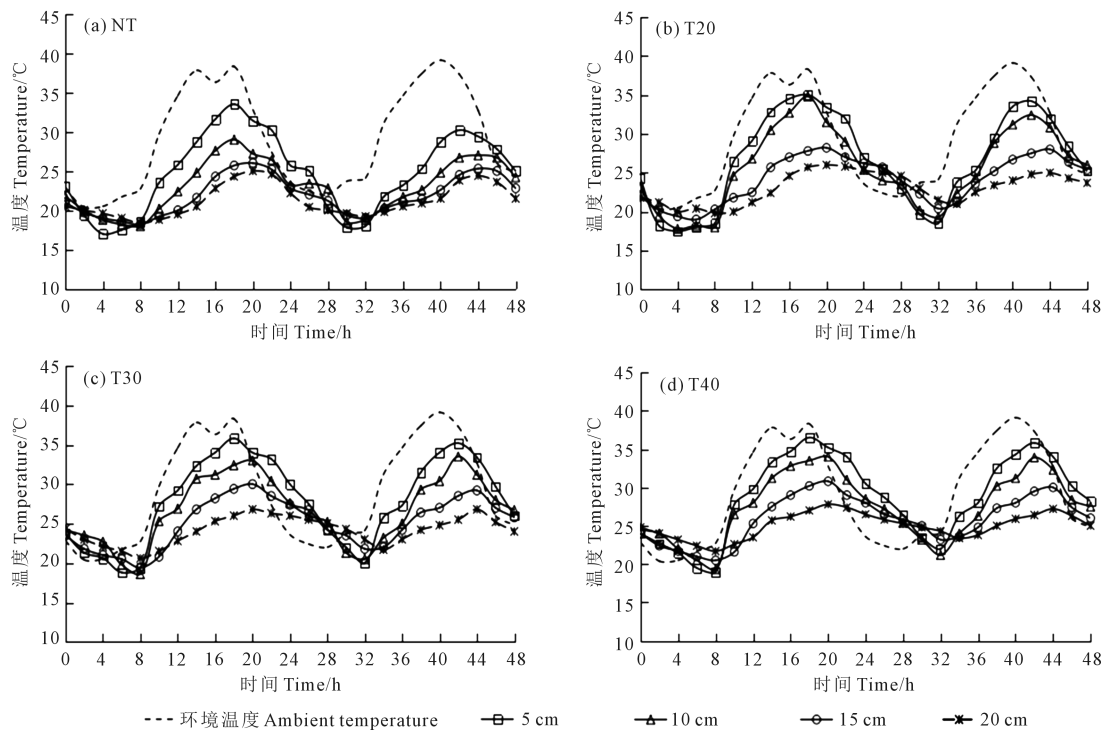


图 5 不同翻耕深度处理下棉花苗期各层土壤温度
Fig.5 Different plowing depth on temperature in different soil layer of cotton in seeding stage

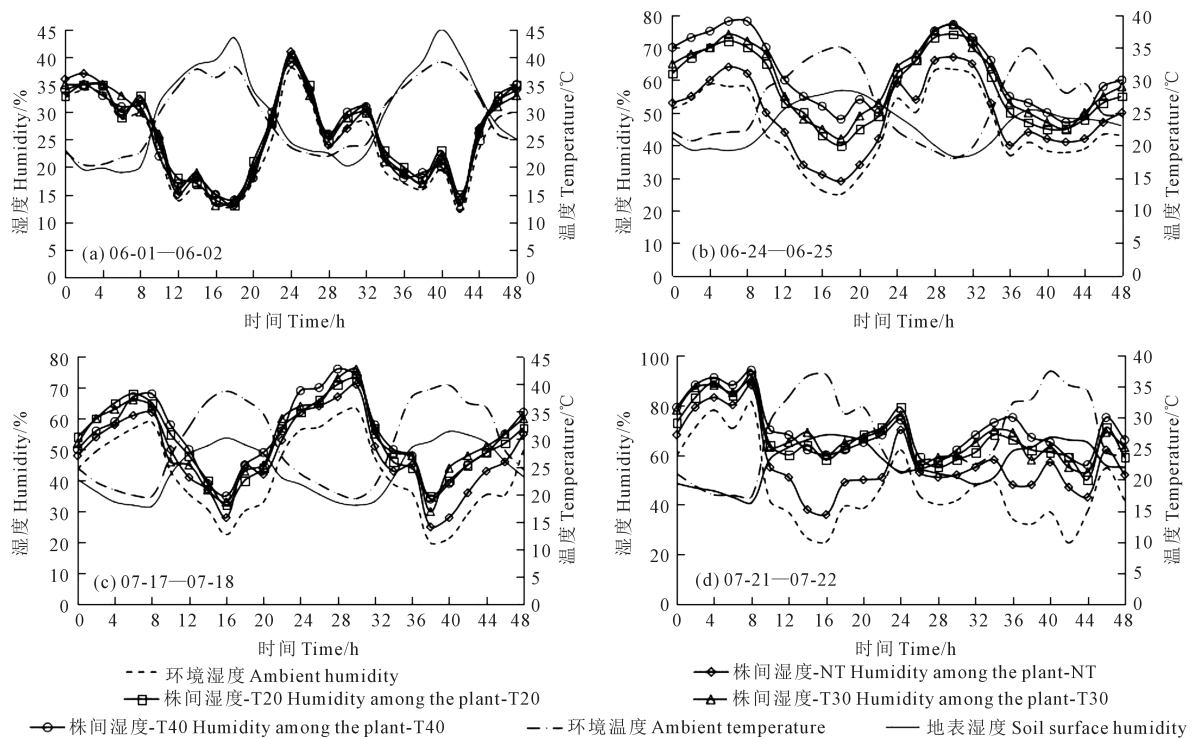


图 6 不同翻耕深度处理下棉花不同生育阶段冠层温度、湿度
Fig.6 Cotton canopy temperature and humidity in different growth stage under different plowing depth

进入灌水期后,棉花冠层覆盖面相对较大,阻碍了光线直接照射地表,降低了地表温度及近地表冠层的水汽扩散量;各翻耕深度处理的近地表冠层湿度均大于大气湿度。蕾期(图 6b),各处理(NT、T20、T30、T40)对应的日平均近地表冠层湿度分别比大气湿度高 3.68%、12.04%、13.96%、16.64%。花

铃期(图 6c),在灌水之前由于土壤含水率相对较低,蒸发蒸腾量大为减少,各翻耕深度处理的近地表冠层湿度变化规律与大气湿度变化规律基本一致,各处理的平均近地表冠层湿度比大气湿度高 6.36%~12.12%。灌水之后(图 6d),土壤水分得到有效补充,土壤贮存的水量能够充分保证作物的蒸发蒸腾,各处理的日平均近地表冠层湿度比大气湿度高 10.48%~23.40%;而且,随着翻耕深度的增加,膜内贮水量更大,供给蒸腾所需的水分也更为充足,导致冠层湿度较高。灌水后(07-21—07-22),各处理(NT、T20、T30、T40)的日平均近地表冠层湿度分别比大气湿度高 10.48%、20.60%、21.64%、23.40%,分别比灌水前(07-17—07-18)的相应数值高 4.13%、9.85%、10.61%、11.21%。全生育期内,各处理(T20、T30、T40)的平均近地表冠层湿度分别比 NT 处理高 12.83%、14.49%、17.55%。

2.5 翻耕深度对棉花生长状况及产量的影响

作物生长状况受品种、气象状况、翻耕深度、施肥状况等综合作用的影响^[21~23]。在其他影响因素均相同的条件下,翻耕深度导致土壤结构及温、湿度变化对植株各生长阶段都有影响。对不同翻耕深度处理的膜下滴灌棉花各生育阶段进行统计,结果见表 3。

翻耕处理较高的储热能力显著缩短了棉花播

种-出苗阶段的时间,各翻耕处理(T20、T30、T40)的播种-出苗期分别比 NT 处理提前 2、6、4 d。出苗后,翻耕处理的各生育期进程明显减慢,出苗-现蕾期时间延长的最为明显,各处理(T20、T30、T40)分别比 NT 处理延长 1、7、8 d。盛铃-吐絮期也有所延长,分别比 NT 处理延长 2、3、7 d。各翻耕处理(T20、T30、T40)的棉花全生育期分别比 NT 处理长 10、16、23 d。这与郭仁松等^[2]通过对棉田土壤进行不同翻耕深度处理研究,得出深翻处理延长了棉花全生育期的结论一致。这一现象的产生不仅与土壤水汽上升速率及储水能力有关,也与棉花不同生育阶段的耗水能力有关。出苗-现蕾期为棉花的营养生长阶段,翻耕深度的增加会加速下层土壤水汽的上升速度来供给植株营养生长所需水量;浅耕处理由于未打破犁底层,水汽供给不足,导致生育阶段提前;进入灌水期后,翻耕深度的增加会提高膜内土壤的储水能力,但棉花生长后期的耗水能力有所降低^[24],使得深翻处理下棉花的盛铃-吐絮阶段有所延长。

不同的翻耕处理所产生的土壤水热状况以及田间小气候状况不同,进而导致棉花的生长状态也出现差异。棉花的有效株占比、株高、果枝数以及籽棉产量等指标都随翻耕深度的增加呈增大趋势(表 4)。

表 3 翻耕深度对棉花生育期的影响/d
Table 3 Effects of tillage depth on cotton growth period

处理 Treatment	播种~出苗 Sowing to seedling emergence	出苗~现蕾 Seedling to budding	现蕾~开花 Budding to flower	开花~盛花 Flower to flower flourish	盛花~盛铃 Flower flourish to boll flourish	盛铃~吐絮 Boll flourish to boll opening	全生育期 Full growth day
NT	19±3a	17±3d	27±2b	21±2b	13±3c	17±2c	114±4c
T20	17±2b	18±2b	30±3b	25±2a	15±2c	19±3c	124±5bc
T30	13±3c	24±2ab	32±1a	24±2ab	17±3b	20±2b	130±6b
T40	15±2c	25±3a	32±3a	23±3b	18±2a	24±4a	137±5a

注:表中数据为平均值±标准差,同列数据后不同字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平。下同。
Note: Table 's data means average± standard deviation; different lowercase letters in the same column mean significant differences at $P<0.05$ level. The same below.

表 4 翻耕深度对棉花生长、产量和水分利用效率的影响
Table 4 Effects of tillage depth on cotton growth, yield and water use efficiency

处理 Treatment	有效株占比 Effective plant percentage/%	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	果枝数/台 Branch number per plant	结铃数/个 Boll number per plant	衣分 Lint/%	籽棉产量 Cotton yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE /(kg·m ⁻³)
NT	60.59b	68.12±7.91c	11.17±0.86a	7.00±1.41b	7.00±1.89a	41.57±0.65a	4141.55c	0.87d
T20	86.95a	71.63±4.74c	10.70±0.82a	7.23±1.17b	6.30±1.26b	41.80±1.31a	4812.23c	1.01c
T30	89.31a	77.09±2.00b	10.87±1.02a	7.43±1.15ab	6.60±1.38b	42.20±0.22a	5394.22b	1.14b
T40	89.64a	82.98±3.17a	10.80±1.01a	7.73±1.00a	7.20±1.01a	42.23±1.02a	5725.57a	1.21a

由于棉花苗期的耐旱和耐盐能力最弱^[25],深翻措施可降低表土盐分含量^[1]、提高土壤温度,有利于棉花根系生长,所以,各翻耕处理(T20、T30、T40)的棉苗有效株占比分别比NT处理高26.36、28.71、29.05个百分点。

棉花株高随翻耕深度的增加而增高,T20、T30、T40处理的棉花株高分别比NT处理高3.51、8.97、14.86 cm。受株高影响,果枝数及结铃数也随翻耕深度的增加而增多。T20、T30、T40处理的果枝数分别比NT处理多0.23、0.43、0.73台果枝;T40处理的结铃数分别比T20、T30处理多0.9、0.6个棉铃;NT处理由于出苗率低,生长空间相对较大,导致结铃数处在中上水平。棉花产量性状提高,产量也随翻耕深度的增加而提高,T20、T30、T40处理的棉花产量分别比NT处理高670.68、1 252.67、1 584.02 kg·hm⁻²;水分利用效率分别比NT处理高16.09%、31.03%、39.08%。

3 讨论

棉花生长过程中,根系从土壤中吸取水分,再通过叶片气孔蒸散到大气中去,形成土壤-植物-大气水分连续循环(SPAC)。土壤孔隙率增大不仅可以增加土壤蓄水能力,还可以提高土壤储存能量的能力^[26]。宋家祥等^[27]研究得出,土壤容重在1.2~1.4 g·cm⁻³时最适合棉花根系生长和充分发挥根系生产力。本研究通过对不同翻耕深度处理下的棉花生长指标及不同生育阶段的土壤容重和孔隙率进行测定,发现随着翻耕深度的增加,土壤容重降低,相应的棉花冠层小气候指标和棉花产量等指标都向促进棉花增产的方向发展。

棉花作为喜温植物,土壤温度在整个棉花生育过程起着重要作用。Kim等^[28]研究得出,土壤温度是影响土壤水分运动、植株生长的最主要原因之一,较高的土壤积温对作物产量的提高也有促进作用。Wang^[29]通过8年的试验结果得出,土壤温度的提高可以降低水分的表面张力,有利于作物根系对土壤水分的吸收,促进作物生长。有研究表明,棉花根系生长最适宜的土壤温度为25℃左右^[30],本文试验中观测到,免耕处理的土壤日均温基本都在25℃以下,而翻耕深度40 cm处理的土壤日均温在25℃以上,因此深翻处理增大了棉花根系对土壤水分的吸收能力,使对应的棉花株高、果枝数及产量也都高于浅耕及免耕处理。

植物蒸腾的水分有相当部分由根系吸自较深土层,而裸地蒸发的水分主要来自于表土^[31]。Stirzaker等^[32]研究发现,疏松的土壤结构能够使根系获取到更多的水分;康绍忠等^[33]研究认为蒸发蒸腾通量中大部分水汽都是由植株蒸腾来提供。而膜下滴灌技术的最大特点是将大量水分聚集于膜内供植物吸收,深翻后又能够提高膜内耕层土壤含水率来供给植株蒸腾,提高了冠层空气与土壤间水汽传输,且较高的叶面覆盖率降低了棉花下部的水汽扩散速率,导致深翻条件下的棉花近地表冠层湿度较大。

刘苟晚等^[34]从影响植株生长的水环境及容重角度出发进行研究,得出水分对植物生长的影响大于土壤容重产生的机械阻力对植株根系生长的影响的结论。而农田小气候主要通过水分进行调节,本研究结果表明,深翻处理下的植株根系向深层土壤中分布的量增多,增加了植株耗水,根据土壤-植物-大气连续体内的水量平衡原理^[33],土壤中的水分由植物根系吸收扩散到大气中,耗水量的增加使农田冠层湿度随翻耕深度的增加而增大。新疆处于大陆性干旱地区,昼夜温差较大,南疆地区这种现象更加明显,且南疆大面积农田处于荒漠边缘地带,空气湿度常年较低,但这些地区都普遍采取膜下滴灌技术进行作物种植。那么,在农田灌水定额一致的条件下,翻耕深度的增大对调节农田小气候有促进作用,深翻处理的棉花产量显著高于免耕或浅翻处理(表4)。另外,翻耕深度的变化导致土壤热扩散率及热通量等方面呈现差异,翻耕深度的增加使得地积温升高,导致根系对离子吸附能力的影响更值得探究。

4 结论

1) 翻耕深度的增大能够增强膜内耕层土壤的储热能力。苗期,T20、T30、T40处理所对应的0~20 cm土层的日总积温量分别比NT处理高214.50℃、322.60℃、408.00℃。

2) 深翻能够增强膜内植株耗水,降低膜外土壤蒸发,棉株从膜内土壤中消耗的水分对冠层小气候的调控作用大于膜外土壤的水分蒸发对冠层小气候的调控作用。NT、T20、T30、T40处理膜内位置的农田耗水量分别是膜外位置农田耗水量的2.48、2.52、3.08、3.47倍;全生育期内,T20、T30、T40处理的膜内、外农田总耗水量分别是NT处理的1.30、

1.42、1.52 倍。

3) 深翻导致农田耗水量的增加使冠层湿度增大,对改善田间小气候、延长作物生长周期、提高棉花产量效果明显。全生育期内,各翻耕处理(T20、T30、T40)的近地表平均冠层湿度分别比 NT 处理高 12.83%、14.49%、17.55%,棉花全生育期分别比 NT 处理长 10、16、23 d,对应的棉花产量分别比 NT 处理高 670.68、1 252.67、1 584.02 kg · hm⁻²。

参 考 文 献:

- [1] 崔建平,田立文,郭仁松,等.深翻耕作对新疆连作滴灌棉田的增产效果[J].中国棉花,2013,40(11):25-28.
CUI J P, TIAN L W, GUO R S, et al. Increasing yield effects of deep plowing in continuous cropping and under-mulch-drip irrigation cotton fields in Xinjiang, China[J]. China Cotton, 2013, 40(11): 25-28.
- [2] 郭仁松,辛涛,崔建平,等.翻耕深度对膜下滴灌棉花农艺性状及产量的影响研究[J].中国农学通报,2015,31(9):147-150.
GUO R S, XIN T, CUI J P, et al. Influence of drip irrigation under mulch of cotton agronomic characters and yield on depth of ploughing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 147-150.
- [3] 李润丰.吹风和加湿对番茄生长及生理的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
LI R F. Effect of blowing and humidification on the growth and physiology of tomato[D]. Yangling: Northwest A and F University, 2018.
- [4] 娄善伟,赵强,高云光,等.密度对棉花冠层小气候影响及其与棉花相关生理特征和纤维品质的关系[J].棉花学报,2010,22(3):260-266.
LOU S W, ZHAO Q, GAO Y G, et al. The effect of different density to canopy-microclimate and quality of cotton [J]. Cotton Science, 2010, 22(3): 260-266.
- [5] 任锋潇,孙红春,张永江,等.不同冠层结构对棉田小气候及蕾铃脱落和产量的影响[J].棉花学报,2016,28(4):361-368.
REN F X, SUN H C, ZHANG Y J, et al. Effects of different canopy structures on boll abscission, yield, and field microclimate of cotton [J]. Cotton Science, 2016, 28(4): 361-368.
- [6] BORGHEI A M, TAGHINEJAD J, MINAEI S, et al. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance, and cotton yield in Northwest of Iran[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2008, 10(1): 120-123.
- [7] 樊贵盛,孔令超,韩永鸿,等.土壤脱水过程中结构与含水率间的定量关系[J].灌溉排水学报,2012,31(5):40-43.
FAN G S, KONG L C, HAN Y H, et al. The quantitative relationship between soil structure and moisture content during soil dehydration process[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 40-43.
- [8] 王东,徐学欣,张洪波,等.微喷带灌溉对小麦灌浆期冠层温湿度变化和粒重的影响[J].作物学报,2015,41(10):1564-1574.
WANG D, XU X X, ZHANG H B, et al. Effects of irrigation with micro-sprinkling hoses on canopy temperature and humidity at filling stage and grain weight of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(10): 1564-1574.

- [9] 代快,蔡典雄,张晓明,等.不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率[J].农业工程学报,2011,27(2):74-82.
DAI K, CAI D X, ZHANG X M, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring corn yield and water use efficiency under different tillage practices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 74-82.
- [10] 刘爽,张兴义.不同耕作方式对黑土农田土壤水分及利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):126-131.
LIU S, ZHANG X Y. Effects of tillage management on soil water dynamics, yield and water use efficiency in arable black soil cropping system in northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 126-131.
- [11] 翟振,李玉义,郭建军,等.耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(11):115-123.
ZHAI Z, LI Y Y, GUO J J, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat-summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 115-123.
- [12] 王秋菊,刘峰,焦峰,等.深耕对黑土水分特征及动态变化影响[J].土壤通报,2018,49(4):942-948.
WANG Q J, LIU F, JIAO F, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in black soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 942-948.
- [13] 张凯,刘战东,强小曼,等.深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响[J].农业机械学报,2019,50(10):251-258.
ZHANG K, LIU Z D, QIANG X M, et al. Effects of subsoiling on soil moisture and crop water consumption in farmland of northern Henan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 251-258.
- [14] LI H X, MOLLIER A, ZIADI N, et al. The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the distribution and morphology of corn root [J]. Plant and Soil, 2017, 412(1/2): 97-114.
- [15] 王树森,邓根云.地膜覆盖增温机制研究[J].中国农业科学,1991,(3):74-78.
WANG S S, DENG G Y. A study on the mechanism of soil temperature increasing under plastic mulch [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1991, (3): 74-78.
- [16] 姬祥祥,徐芳,刘美含,等.土壤水基质势膜下滴灌春玉米生长和耗水特性研究[J].农业机械学报,2018,49(11):230-239.
JI X X, XU F, LIU M H, et al. Investigation on growth and water use of spring maize under mulched drip irrigation based on soil matric potential [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 230-239.
- [17] 卢奕丽,张猛,刘晓娜,等.含水量和容重对旱地耕层土壤热导率的影响及预测[J].农业工程学报,2018,34(18):146-151.
LU Y L, ZHANG M, LIU X N, et al. Effects of soil water content and bulk density on thermal conductivity of plough layer soil in arid land and its prediction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(18): 146-151.
- [18] TAN F, ZHOU W H, YUEN K V. Modeling the soil water retention properties of same-textured soils with different initial void ratios [J].

- Journal of Hydrology, 2016, 542: 731-743.
- [19] 李明思,王菊红,陈明珠,等.膜下滴灌条件下膜下凝结水对滴灌带的影响分析[J].节水灌溉,2008,(9):1-3.
- LI M S, WANG J H, CHEN M Z, et al. Effect of condensed water drops under plastic film on drip line under mulched drip irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2008,(9): 1-3.
- [20] 赵元杰,张鹤年,吾尔尼沙汗.新疆策勒"双株双层"栽培棉田小气候特征[J].干旱区研究,2002,(4):38-41.
- ZHAO Y J, ZHANG H N, UERNI SHAHAN. The microclimate characteristics in the cotton fields cultivated in the "double-stem and double-layer" way in Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2002, (4): 38-41.
- [21] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等.深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J].农业工程学报,2015,31(10):167-173.
- XIE Y X, JIN H Y, MENG Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 167-173.
- [22] 唐淑荣,魏守军,郭瑞林,等.不同熟性棉花品种纤维品质特征分析与评价[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1564-1577.
- TANG S R, WEI S J, GUO R L, et al. Evaluation and analysis of fiber quality characteristics of different maturity cotton varieties [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10): 1564-1577.
- [23] 王远远,乔露,陈宗奎,等.土壤深层水和施肥深度对棉花生长发育及水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2018,27(6):812-818.
- WANG Y Y, QIAO L, CHEN Z K, et al. Effect of deep layers water and fertilizer application depth on cotton growth and water use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(6): 812-818.
- [24] 崔静,王振伟,荆瑞,等.膜下滴灌棉田土壤水盐动态变化[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):50-53.
- CUI J, WANG Z W, JING R, et al. Dynamic changes of soil water and salt in cotton field under mulched drip irrigation condition [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 50-53.
- [25] 王春霞,王全九,刘建军,等.灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):28-33.
- WANG C X, WANG Q J, LIU J J, et al. Effects of mineralization of irrigation water and soil salinity on cotton emergence rate in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 28-33.
- [26] 郭李娜,樊贵盛.旱作农田土壤表层容重年内变化特性的试验研究[J].节水灌溉,2018,(1):19-23.
- GUO L N, FAN G S. An experimental study on annual change of soil surface bulk density of dry farmland[J]. Water Saving Irrigation, 2018,(1): 19-23.
- [27] 宋家祥,庄恒扬,陈后庆,等.不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J].作物学报,1997,23(6):719-726.
- SONG J X, ZHUANG H Y, CHEN H Q, et al. Effect of soil compaction on root growth of cotton [J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(6): 719-726.
- [28] KIM S H, GITZ D C, SICHER R C, et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(3): 224-236.
- [29] WANG T Y. Crop forecasts without weather predictions[J]. Crops and Soils, 1962, 14(9): 7-9.
- [30] 蒋高明.植物生理生态学[M].北京:高等教育出版社,2004:150-154.
- JIANG G M. Plant ecophysiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 150-154.
- [31] 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成,等.小气候和农田小气候[M].北京:农业出版社,1981:238.
- WENG D M, CHEN W L, SHEN J C, et al. Microclimate and farmland microclimate[M]. Beijing: Agricultural Press, 1981: 238.
- [32] STIRZAKER R J, PASSIOURA J B. The water relations of the root-soil interface[J]. Plant, Cell & Environment, 1996, 19(2): 201-208.
- [33] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.
- KANG S Z, LIU X M, XIONG Y Z. Water transport theory of soil plant atmosphere continuum and its application[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.
- [34] 刘晚苟,山仑,邓西平.不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J].西北植物学报,2002,22(4):831-838.
- LIU W G, SHAN L, DENG X P. Effects of soil bulk density on the growth of maize root system under different water condition[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(4): 831-838.