

·作物水肥高效利用·

文章编号: 1672-3317(2023)11-0001-10

不同颜色地膜覆盖对盐碱地水热盐状况及 向日葵产量和水分利用效率的影响

张玉洁^{1,2}, 王宁^{1,3}, 杨彬¹, 王凤新^{1*}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市水务规划研究院, 北京 100048;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 【目的】研究不同颜色地膜覆盖对盐碱地土壤水热盐环境及向日葵产量的影响, 探究影响盐分运移的机理。【方法】2021年在内蒙古河套灌区开展了向日葵种植试验, 设置黑色地膜覆盖(BM)、透明地膜覆盖(TM)和不覆膜(NM)3种处理, 通过测量向日葵生育期内的土壤温度、含水率及全盐量, 探究不同覆膜处理对盐碱地土壤温度变化、水盐运移特点和向日葵产量的影响。【结果】与NM处理相比, TM处理和BM处理向日葵苗期和现蕾期0~15 cm土层的土壤温度显著提高, 分别提高了5.3~9.0 °C ($P<0.05$)和2.9~5.8 °C (苗期 $P<0.05$), BM处理比TM处理低1.25~3.45 °C ($P>0.05$), 开花期BM处理比TM处理低4.25~5.25 °C ($P<0.05$); 在土壤基质势接近-20 kPa时, 0~20 cm土层土壤含水率BM处理和TM处理分别比NM处理高21.3% ($P<0.05$)和10.6% ($P>0.05$), BM处理比TM处理高9.8% ($P>0.05$); 整个生育期0~10 cm土层土壤全盐量BM处理和TM处理分别比NM处理低51.6%~81.7% ($P<0.05$)和28.9%~80.5% ($P<0.05$), BM处理比TM处理低4.1%~36.2% ($P>0.05$)。覆膜可以显著提高向日葵产量和水分利用效率, BM、TM处理产量分别比NM处理高51.8%、50.1% ($P<0.05$), 水分利用效率提高49.7%、48.9% ($P<0.05$)。黑膜对土壤水盐量、作物产量及水分利用效率的影响效果均好于透明膜, 但差异不显著。【结论】2种覆膜处理均能显著增加土壤水分, 减少盐分在土壤表层积聚, 提高向日葵的产量和水分利用效率; 黑膜与透明膜覆盖处理下土壤温度效应不同, 黑膜比透明膜能保持更多土壤水分, 降低表层土壤全盐量, 黑膜覆盖更适合盐碱地控盐增产。

关键词: 覆膜; 盐碱地; 盐分; 温度; 向日葵

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022618

OSID: 

张玉洁, 王宁, 杨彬, 等. 不同颜色地膜覆盖对盐碱地水热盐状况及向日葵产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 1-10.

ZHANG Yujie, WANG Ning, YANG Bin, et al. Effects of Plastic Mulch Film Color on Moisture-heat-salt and Water Use Efficiency of Sunflower in Saline-alkali Land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 1-10.

0 引言

【研究意义】目前全球盐碱地总面积约 1.1×10^9 hm^2 , 仍在不断增加^[1]。我国盐碱地总面积约 3.7×10^7 hm^2 ^[2], 分布广泛。土壤盐碱化是影响作物产量的核心环境问题之一^[3], 是农业可持续发展的重大威胁。合理利用盐碱地关系国家粮食安全, 提高其耕地质量和生产力水平对农业发展具有重要意义。向日葵是我国重要的经济作物之一, 多种植在干旱半干旱地区。虽然向日葵具有一定的耐盐碱性, 但

是土壤盐分仍是影响其生长和产量的重要因素。降低盐碱地向日葵根层含盐量可提高向日葵出苗率, 促进其生长^[4]。

【研究进展】孔东等^[5]在河套灌区不同盐渍化土壤进行田间试验, 发现含盐量增加会抑制向日葵生长, 当全生育期土壤含盐量高于 5 g/kg 时, 减产 45.5%。岳云等^[6]研究发现当土壤含盐量为 5.5~6.5 g/kg 时, 受盐碱胁迫的油葵植株通过自身生理调节, 生理指标出现明显的适应值, 但当土壤含盐量超过 6.5 g/kg 时, 油葵自身的生理调节能力明显下降, 产量随之大幅度下降。盐分运移受制于土壤水分和温度, 而水分在温度梯度下的运动决定盐分总的运动和变化趋势^[7]。地膜覆盖通过调节土壤温度, 减小土壤水分蒸发, 影响盐分运动。大量研究表明地膜覆盖能减少近地表空气层中的潜热和显热交换^[8], 改变土壤温度。土壤中水热运动是相互影响的, 杨

收稿日期: 2022-11-02 修回日期: 2023-07-31 网络出版日期: 2023-11-15

基金项目: 河套灌区水肥盐高效协同调控技术与应用项目(69111006);

向日葵节水控盐提质高效灌溉制度及综合调控项目(69111009)

作者简介: 张玉洁(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事灌溉排水理论与新技术研究。E-mail: yj_zhang1007@163.com

通信作者: 王凤新(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事滴灌理论及作物生长环境调控研究。E-mail: fxinwang@cau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

湘等^[9]研究发现土壤水势高低出现的时间与土壤温度高低值时间相呼应, 40 cm 土层土壤温度与土壤水势呈极显著相关性, 水分运动会影响土壤热容量及导热率, 从而影响土壤温度; 同时土壤温度的变化会影响水的黏滞性和表面张力, 进而影响土壤基质势。土壤温度梯度的变化使地膜覆盖具有提熵作用^[10]。同时地膜的阻隔作用能减少土壤水分蒸发散失, 使地膜与地表之间形成饱和水汽层, 保持土壤水分, 减少盐分在地表的积聚^[11]。不覆膜条件下土壤蒸发量大, 盐分在土壤表层大量累积。Dong 等^[12]研究发现, 与不覆膜相比, 透明膜覆盖显著控制了棉花根区土壤盐分, 提高土壤温度, 减少土壤水分损失。张德奇等^[13]研究发现, 地膜覆盖能抑制盐碱地返盐, 在膜下形成低盐耕作层, 降低盐碱危害。

【切入点】不同颜色地膜光学特性不同, 对短波和长波辐射的吸收、反射和透射的作用不一样^[14], 进而对土壤温度、含水率和全盐量的影响不同。相较于透明膜, 黑色地膜透光率低, 气温低时能提高土壤温度, 但在高温条件下会降低膜下土壤温度^[15], 进而对土壤水盐运移产生影响。目前对于盐碱地不同颜色地膜覆盖下土壤水盐运移规律尚不明确, 选择合适的覆膜颜色对盐碱地作物生长具有重要意义。

【拟解决的关键问题】本研究通过田间试验研究黑膜、透明膜及不覆膜处理对土壤水热分布及盐分运移影响, 探究影响盐分运移的机理, 以期对盐碱地控制土壤盐分运移, 促进作物生长提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年6—9月在内蒙古巴彦淖尔市中国农业大学河套实验站开展 (107°52' E, 40°44' N, 海拔1 042 m)。试验区属于温带大陆性气候, 降水量少, 蒸发强烈, 年平均降水量140 mm, 年平均蒸发量2 200 mm, 年日照时间3 200 h, 年平均气温7 °C, 无霜期约180 d。试验期间的日最高气温、日最低气温、日平均气温及灌水量和降水量见图1。试验区紧邻合济渠, 受渠道行水和灌溉的双重影响, 地下水埋深浅, 生育期内地下水埋深介于1.07~2.04 m (图2), 地下水年平均矿化度3.84 g/L。在作物播种前分层采集试验区0~100 cm土层的土壤, 测量土壤物理及水力参数, 并用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., UK)。分析不同土层的土壤颗粒组成, 根据美国制土壤颗粒分类标准确定土壤质地。具体数据见表1。

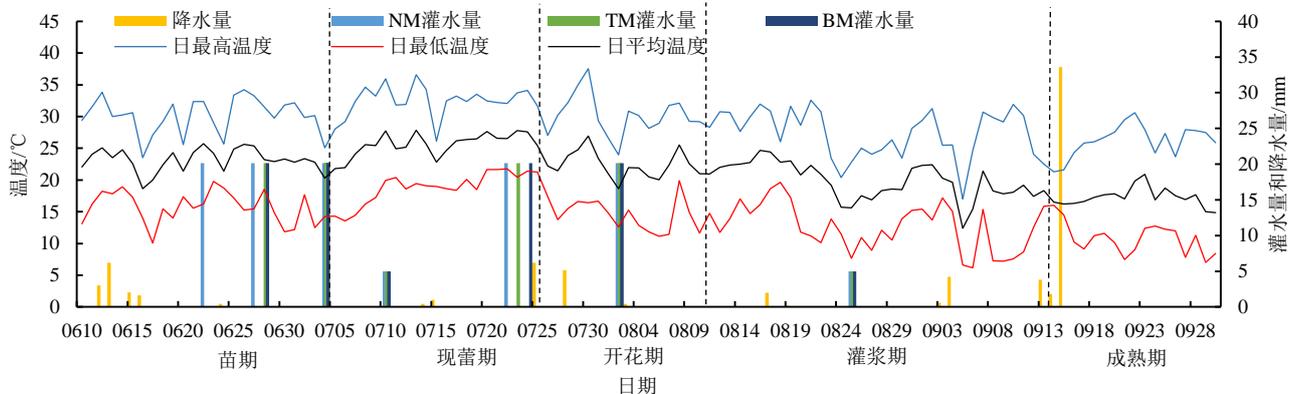


图1 向日葵生育期内日最高温度、日最低温度、日平均温度及灌水量和降水量

Fig.1 Daily maximum air temperatures, minimum air temperatures, mean air temperatures, irrigation and precipitation during sunflower growing period

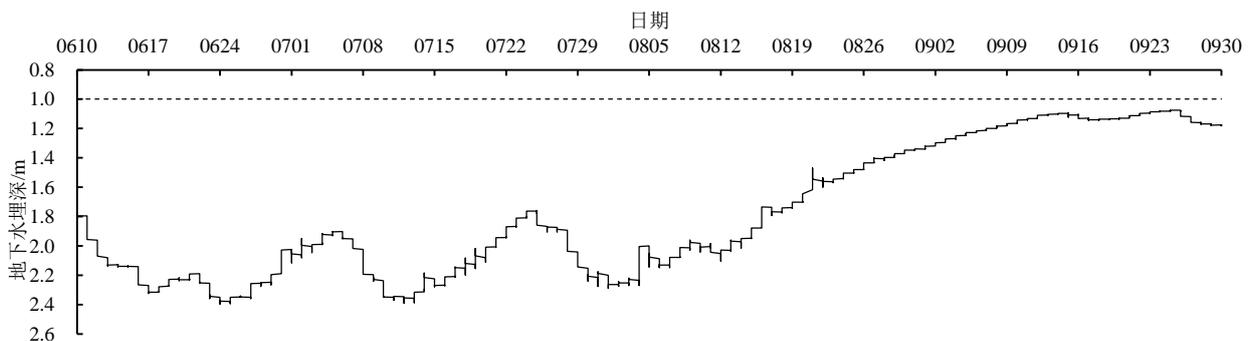


图2 向日葵生育期内地下水埋深

Fig.2 Groundwater depth during the growth period of sunflower

表1 试验区土壤物理及水力参数

Table 1 Soil physical and hydraulic parameters in experimental field

土层深度/cm	粒径分布/%			土壤质地	田间持水率/%	全盐量/(g kg ⁻¹)	pH值	土壤体积质量/(g cm ⁻³)	土壤孔隙率/%
	<2 μm	2~50 μm	50~2 000 μm						
0~10	4.0	53.1	42.9	砂质壤土	28.6	4.9	9.0	1.37	48.1
10~20	4.6	55.7	39.7	砂质壤土	26.5	2.7	9.1	1.46	45.1
20~40	3.8	52.3	43.9	壤土	31.1	2.0	9.1	1.53	42.4
40~60	4.1	59.4	36.4	砂质壤土	34.4	1.6	8.9	1.50	43.4
60~80	3.6	58.5	37.8	砂质壤土	34.3	1.5	8.6	1.53	42.4
80~100	1.7	28.3	70.0	粉砂壤土	33.3	1.3	8.7	1.53	42.4

1.2 试验设计

试验作物为食用向日葵，品种为“谷丰6号”。设计黑色地膜覆盖（BM）、透明地膜覆盖（TM）和不覆膜（NM）3个处理，每个处理3个重复，小区随机布置，小区面积为42 m²（6 m×7 m）。黑色地膜和透明地膜均为聚氯乙烯膜，厚度0.015 mm，宽度80 cm。2021年5月22日播前施底肥，基施羊粪堆肥（含氮量1.5%）3 000 kg/hm²，磷酸氢二铵（含P₂O₅量61%）295 kg/hm²，硫酸钾（含K₂O量50%）150 kg/hm²。向日葵生育期内总施氮量135 kg/hm² [16]，其余氮肥在现蕾期、开花期和灌浆期按照2:3:2的比例随水追施3次尿素，分别在7月10日（灌水5 mm）、8月2日（随灌水追施）和8月25日（灌水5 mm）。5月28日（向日葵播种前）利用黄河水压盐，灌水量为120 mm，矿化度0.485 g/L。生育期内采用膜下滴灌，每个小区独立控制，滴灌带布置在垄顶中间，1条滴灌带控制1行作物。选用内镶式滴灌带（型号dn16*0.3*300*2 L/h，北京中财万鑫科技有限公司），滴灌带内径16 mm，壁厚0.4 mm，滴头流量2.0 L/h，滴头间距30 cm。在每个处理的3个重复中随机挑选2个小区，在小区中间一垄的滴灌带滴头正下方埋设负压计（型号WST-2B，北京奥特思达科技有限公司），埋设深度为20 cm，用来控制灌水下限，当土壤基质势达到-20 kPa时开始灌水。灌水定额计算式为：

$$Q=1\ 000\times HP(\theta_{\max}-\theta_{\min})/\eta, \quad (1)$$

式中： Q 为灌水定额（mm）； H 为土壤计划湿润层深度（0.4 m）； P 为设计土壤湿润比（55%）； θ_{\max} 为计划湿润层内的设计灌后平均体积含水率（%），取0~40 cm土层平均田间持水率（29%）； θ_{\min} 为计划湿润层内平均土壤含水率下限（%），即土壤水基质势在-20 kPa时的土壤含水率（田间持水率的70%）； η 为灌溉水利用系数，取0.95，3个处理灌水定额相同，每次灌水20.15 mm，3个处理各次灌水日期见图1。

采用1垄1行的种植方式，垄幅100 cm，垄面宽60 cm，沟宽40 cm，沟深20 cm，株距30 cm，种植密度约27 750株/hm²。播种时间为2021年6月10日，

收获时间为9月26日，向日葵生长各生育期起止时间见图1。

1.3 试验监测指标与方法

利用试验站的自动气象站（Hobo U30，Onset Computer Corp. MA, USA）监测最高、最低及平均气温和降水量，利用地下水位监测井布置1套Hydros 21记录地下水位。

1.3.1 土壤温度测定

土壤温度用曲管地温计进行观测，在每个处理中选取2个小区，将地温计布置在小区中间1垄2株向日葵之间的滴头正下方，分别埋设5、10、15、20 cm 4个监测深度。每间隔10 d于14:00进行观测并记录数据。

1.3.2 土壤含水率、全盐量测定

向日葵种植后每隔15 d取土，在垄顶2个滴头中间用土钻取0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层样品，分成2份。1份直接放入铝盒中用烘干法测定土壤质量含水率。

土壤质量含水率 θ_m 的计算式为：

$$\theta_m = \frac{w_1 - w_2}{w_2}, \quad (2)$$

式中： θ_m 为质量含水率（g/g）； w_1 为湿土质量（g）； w_2 为烘干土质量（g）。

土壤孔隙率 n 计算式：

$$n = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中： ρ_b 为土壤干体积质量，取测量的本底值（g/cm³），见表1； ρ_s 为土粒平均密度，取2.65（g/cm³）。

1份置于室内自然风干磨碎后过2 mm筛，制备1:5土水比的浸提液，用电导率仪（DDSJ-308A，上海仪电科学仪器股份有限公司）测定土壤电导率 $EC_{1:5}$ 。测得的电导率 $EC_{1:5}$ 利用经验公式 [17] 转换为全盐量，经验公式为：

$$S = 2.882EC_{1:5} + 0.183, \quad (4)$$

式中： $EC_{1:5}$ 为测定的电导率值（mS/cm）； S 为土壤全盐量（g/kg）。试验布设取样点位置见图3。

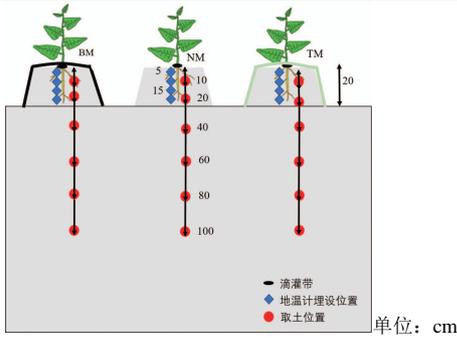


图3 试验布设取样点位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test layout and sampling point location

1.3.3 葵花空秕率、百粒质量及产量

葵花成熟收获时，在各小区分别选取6株进行考种，晒干脱粒测量单株产量，通过种植密度估算每公顷产量。

百粒质量为随机取100粒葵花称其质量，重复3次，取其平均值；空秕率为随机取3组籽粒，数出其中的空壳数，重复3次，取平均值。

1.3.4 作物实际蒸散量

利用土壤水量平衡方程计算作物实际蒸散量 ET_a ：

$$ET_a = I + P_e + \Delta W - R - F, \quad (5)$$

式中： I 为灌水量（mm）； P_e 为作物生长季的有效降水量（mm）； ΔW 为作物生长季的土壤蓄水损耗量（mm）； R 为地表径流（mm）； F 为底部边界的垂直土壤水通量（正表示深层渗透，负表示毛管上升补偿）。试验期间降水量少未形成径流，因此， R 为0。

采用美国农业部土壤保护服务法^[18]估算有效降水量 P_e ：

$$\begin{cases} P_e = P \times \frac{125 - 0.2P}{125} & P < 250 \text{ mm} \\ P_e = 125 + 0.1P & P > 250 \text{ mm} \end{cases}, \quad (6)$$

式中： P 为向日葵整个生长季的降水量（mm）； P_e 为向日葵整个生长季的有效降水量（mm）。

向日葵生育期的土壤贮水量消耗量 ΔW 计算式为：

$$\Delta W = W_b - W_e, \quad (7)$$

式中： W_b 为向日葵生育期开始时的土壤贮水量（mm）； W_e 为向日葵生育期结束时的土壤贮水量（mm）。

土壤贮水量 W 计算式为：

$$W_i = G_i \times \rho_b \times SD_i \times 10, \quad (8)$$

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (9)$$

式中： W_i 为第 i 层的土壤蓄水量（mm）； G_i 为第 i 层的土壤质量含水率（g/g）； ρ_b 为相应土层的干体积质量（g/cm³）； SD_i 为第 i 层的土层深度（cm）； W 为0~100 cm土层中的总土壤蓄水量（mm）； n 为土

壤层数，值为6。

100 cm土层深度处的垂直土壤水通量 F 利用达西方程^[19]估算：

$$F = -K(\theta) \left[\frac{\psi_{z1} - \psi_{z2}}{z1 - z2} - 1 \right], \quad (10)$$

$$K(\theta) = K_s \times \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2, \quad (11)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha|\phi|)^n]^m}, \quad (12)$$

式中： $K(\theta)$ 为导水率（cm/d）；选取地面作为坐标原点，方向垂直地面向下， $z1$ 、 $z2$ 分别为90、70 cm土层深度； ψ_{z1} 、 ψ_{z2} 分别为90 cm与70 cm处的土壤基质势（kPa）； K_s 为饱和导水率（cm/d）； θ 为土壤体积含水率（cm³/cm³）； θ_r 为剩余土壤含水率； θ_s 为饱和土壤含水率。 α 、 n 、 m 为土壤水分特征曲线的参数，用VG模型方程（式（11））表示。利用式（11）、式（12）将土壤含水率转化为土壤基质势。通过RETIC计算机程序，利用土壤粒径分布（表1）回归 $K(\theta)$ 和土壤水分特征曲线。拟合出的 K_s 、 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、 m 值分别为16.63 cm/d、0.04 cm³/cm³、0.42 cm³/cm³、0.01、0.32、1.47。利用实测和插值的土壤含水率数据，估算每日垂直水通量。

1.3.5 作物水分利用效率

$$WUE = \frac{Y}{ET_a}, \quad (13)$$

式中： WUE 为水分利用效率（kg/（hm²·mm））； Y 为作物产量（kg/hm²）； ET_a 为作物实际蒸散量（mm）。

1.4 数据处理

利用Excel 2019对数据进行统计、处理；用Origin 2018将试验数据绘制成图；用SPSS Statistics 24统计软件进行数据分析，用单因素方差分析（Analysis of Variance, ANOVA）和最小显著差数法（Least Significant Difference, LSD）进行差异显著性检验（ $P < 0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 不同颜色覆膜对土壤温度的影响

表2为向日葵不同生育期0~20 cm土层土壤日最高温度，由表2可知，整个生育期不同土层土壤温度均先升高后降低，且随土层深度增加土壤温度逐渐降低。随着生育期的推进，不同处理下土壤温度差异逐渐减小。苗期，向日葵种子出苗阶段，作物植株小，土壤几乎处于裸露状态。0~20 cm土层TM处理温度最高，NM处理温度最低。0~20 cm土层TM、BM处理分别比NM处理高5.3~9.0℃和

3.8~5.8 °C ($P<0.05$)；现蕾期 0~15 cm 土层 TM 处理比 NM 处理高 5.3~8.4 °C ($P<0.05$)，BM 处理比 NM 处理高 2.9~5.0 °C ($P>0.05$)，20 cm 处 3 个处理间没有显著差异；开花期是向日葵生育期内气温最高的时期，此时 BM 处理<NM 处理<TM 处理，BM 处理 0~15 cm 土层土壤温度分别比 NM、TM 处理低 0.5~1.3、4.3~5.3 °C；灌浆—成熟期土壤温度表现为 TM 处理>BM 处理>NM 处理，地膜覆盖对土壤温度的影响降低，成熟期各处理无显著性差异。

表 2 不同颜色覆膜下不同土层土壤温度变化

Table 2 Soil temperature at different soil layers of different color film mulches °C

土层深度/cm	处理	苗期	现蕾期	开花期	灌浆期	成熟期
5	BM	41.0±1.4a	44.7±1.3a	47.0±2.8a	40.5±2.1a	30.6±6.3a
	TM	44.3±1.1a	48.1±1.5a	51.3±2.5a	44.3±1.1a	30.7±6.1a
	NM	35.3±0.4b	39.7±3.8b	48.3±3.9a	37.1±4.1a	28.8±5.9a
10	BM	36.0±2.1a	39.2±1.5b	41.0±1.4b	35.8±0.4a	27.0±4.7a
	TM	38.8±0.4a	42.6±1.6a	46.3±1.1a	37.0±1.4a	27.4±5.3a
	NM	31.8±0.4b	36.0±2.6c	42.0±1.4b	34.2±0.9a	26.3±4.5a
15	BM	32.0±0.0a	35.1±1.7ab	36.0±3.5a	32.4±2.0ab	24.4±4.0a
	TM	33.3±0.4a	37.5±1.8a	40.3±0.4a	36.8±1.1a	25.3±4.1a
	NM	27.8±1.1b	32.2±2.5b	36.5±2.1a	31.0±1.4b	24.0±3.4a
20	BM	28.5±0.0a	31.8±0.9a	32.5±2.1a	29.5±1.4a	23.7±2.8a
	TM	30.0±0.0a	31.7±2.4a	32.3±3.9a	29.6±3.4a	23.0±2.3a
	NM	24.8±1.8b	29.0±2.3a	32.5±2.1a	27.8±1.1a	22.1±2.2a

注 表中同列不同字母表示两种处理之间存在显著性差异 $P<0.05$ 。

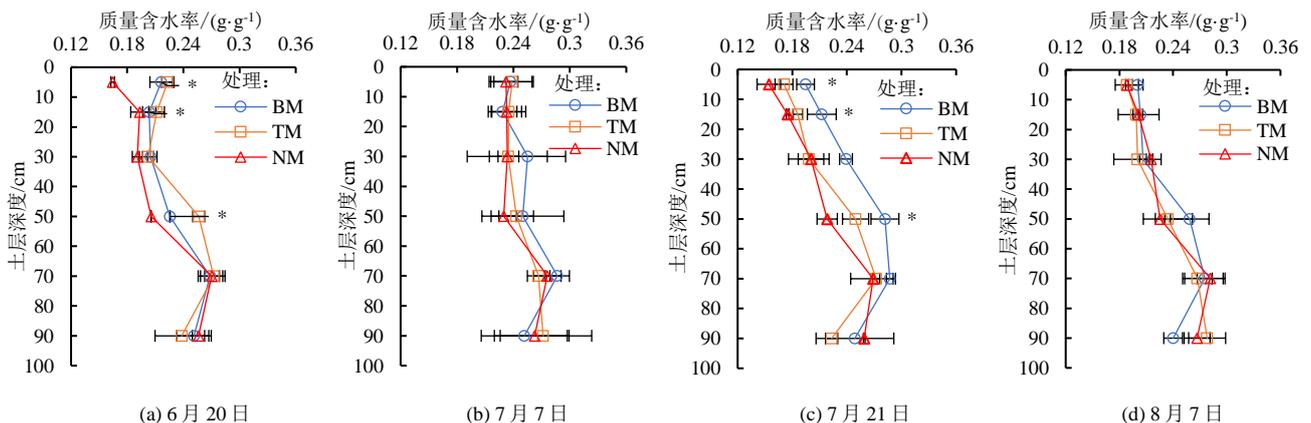
2.2 不同颜色覆膜对土壤水分的影响

图 4 为向日葵各生育期不同处理 0~100 cm 土壤含水率垂向空间分布图（图中“*”表示 3 个处理在 $P<0.05$ 水平存在显著性差异，下同）。从图 4 中可以看出，覆膜明显影响 0~20 cm 土层土壤含水率，整个生育期 BM 处理 0~20 cm 土层平均含水率介于 0.17~0.23 g/g，TM 处理介于 0.16~0.24 g/g，NM 处理介于 0.15~0.23 g/g，NM 处理和 TM 处理含水率变化幅度大。由于播种前压盐灌水量大，6 月 20 日 BM、TM 处理 0~20 cm 土层土壤含水率大于 20~40

cm 土层，NM 处理表层含水率低于下层，之后各生育期 0~80 cm 土层质量含水率从表层到深层逐渐增加，80~100 cm 土层为砂层，持水性差，土壤含水率低。在 6 月 20 日（播种后 10 d）未进行灌溉之前，0~60 cm 土层 TM 处理>BM 处理>NM 处理，TM 处理和 BM 处理平均含水率较 NM 处理分别高 18.5% ($P<0.05$) 和 12.8%，TM 处理比 BM 处理高 5.1%。7 月 7 日和 8 月 7 日分别为灌水后 3 d 和后 5 d，0~20 cm 土层 3 个处理土壤含水率相近，没有显著性差异。7 月 21 日和 8 月 21 日是灌水前（土水势接近 -20 kPa）取土，BM、TM 处理 0~10 cm 土层土壤含水率比 NM 处理分别平均高 26.1% ($P<0.05$)、10.8% 和 21.9% ($P<0.05$)、13.6%，BM 处理比 TM 处理分别平均高 13.9% ($P<0.05$) 和 7.3%；BM、TM 处理 10~20 cm 土层土壤含水率比 NM 处理分别平均高 21.4% ($P<0.05$)、6.5% 和 15.7% ($P<0.05$)、11.3%，BM 处理比 TM 处理分别平均高 14.1% ($P<0.05$) 和 4.0%。8 月 25 日之后向日葵处于灌浆—成熟期，由于向日葵根系深度浅，主要分布在 0~20 cm 土层，灌水后植株易倒伏，不再进行灌水，土壤含水率主要受降水影响，0~60 cm 土层土壤含水率仍然表现为覆膜>不覆膜。60~80 cm 土层为砂质壤土，砂砾占比高，土壤孔隙率大，田间持水率为 34.3%，且地下水位高，导致土壤含水率偏高。

2.3 不同颜色覆膜对土壤全盐量的影响

图 5 为向日葵整个生育期不同深度土壤全盐量变化过程图，由图 5 可知，整个生育期 BM、TM 处理盐分波动小，NM 处理表层土壤全盐量最高，含盐量波动大，呈现明显的表聚现象，随土层深度增加，全盐量逐渐降低且波动小，收获时 BM、TM、NM 处理全盐量分别比苗期增加 95.5%、81.7%、137.9%。由于地下水埋深浅，矿化度高，受蒸发作用影响，下层地下水不断向上运移，将部分盐分带至地表土层，增加土体含盐量，使得 10 cm 以下土层含盐量高于本底值。



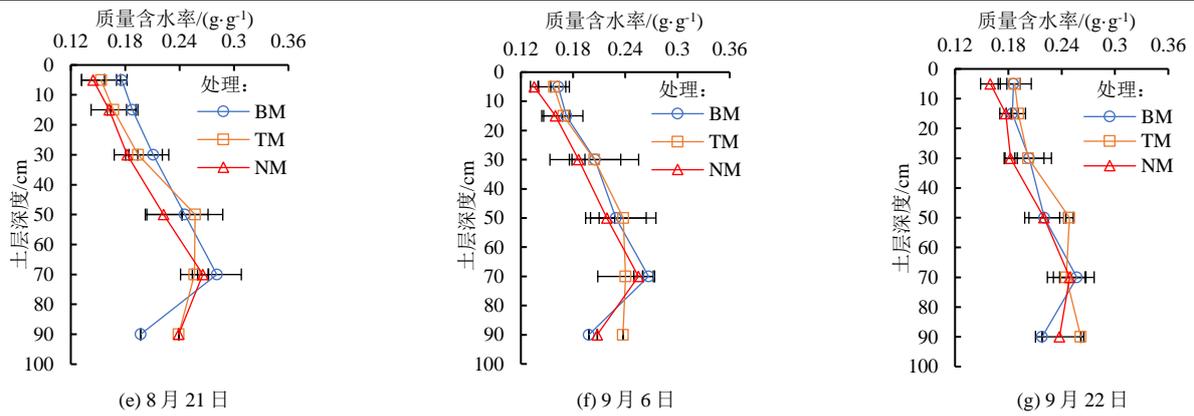


图4 不同颜色覆膜下土壤含水率分布

Fig.4 Soil moisture distributions of different color film mulches

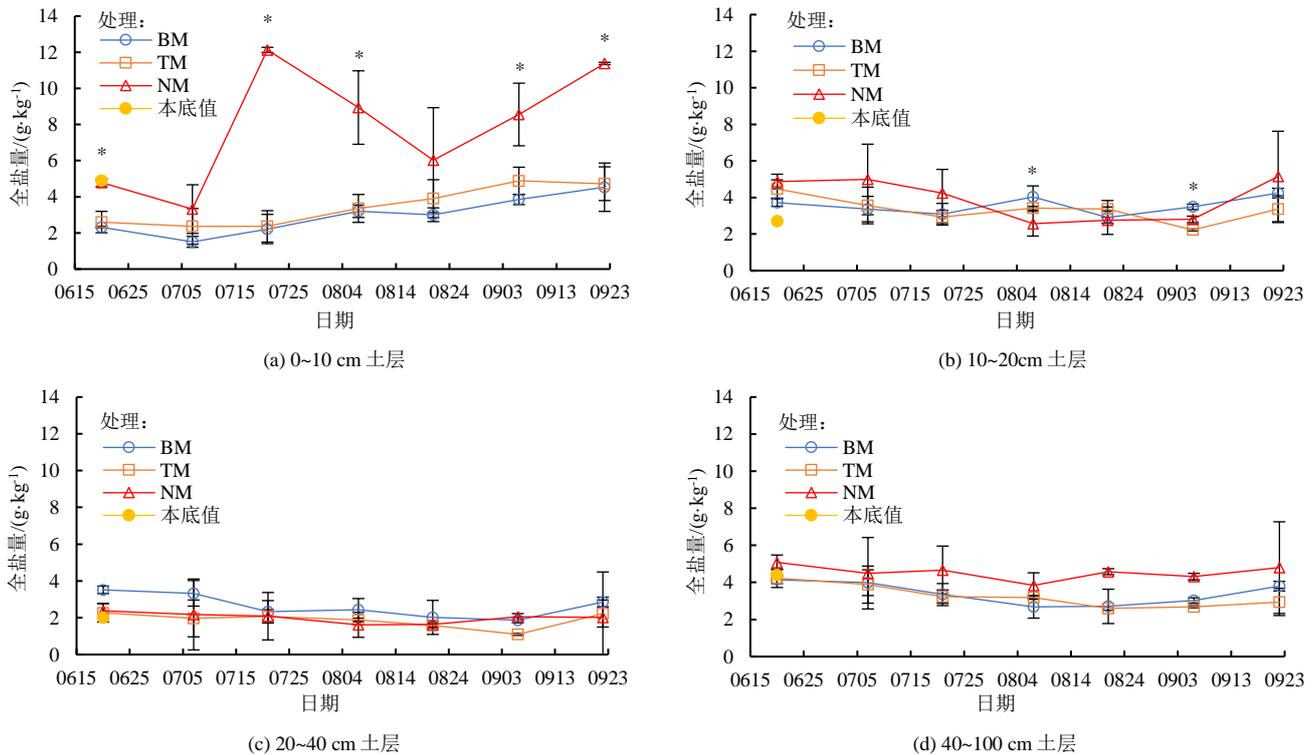


图5 不同颜色覆膜下不同土层土壤全盐量变化

Fig.5 Soil salt content at different soil layers of different color film mulches

整个生育期 0~10 cm 土层全盐量表现为 BM 处理 < TM 处理 < NM 处理, BM 处理含盐量在 1.5~4.5 g/kg, TM 处理全盐量在 2.4~4.9 g/kg, NM 处理全盐量波动大, 介于 3.3~12.1 g/kg; BM 处理全盐量最低, NM 处理全盐量最高, BM 处理和 TM 处理分别比 NM 处理低 51.6%~81.7% 和 28.9%~80.5% ($P < 0.05$); BM 处理比 TM 处理低 4.1%~36.2% ($P > 0.05$), 黑膜与透明膜之间差异不显著。整个生育期 10 cm 以下土层全盐量波动明显减小, 不同覆膜处理间没有显著差异。BM、TM、NM 处理 10~20 cm 土层的全盐量分别为 2.9~4.2、2.2~4.5、2.6~5.2 g/kg, 收获时 BM、NM 处理全盐量分别比苗期增加 14.1%、5.6%, TM 处理降低 24.7%; 20~40 cm 土层处分别为 1.9~3.5、1.1~2.3、1.6~2.4 g/kg, BM、TM、NM 处

理全盐量分别降低 18.8%、1.8%、15.1%; 40~100 cm 土层处分别为 2.7~4.1、2.6~4.2、3.8~5.1 g/kg, NM 处理全盐量明显大于 BM、TM 处理, BM、TM、NM 处理全盐量分别降低 8.3%、30.3%、5.5%, 盐分主要累积到 0~20 cm 土层。

2.4 不同颜色覆膜对向日葵产量、产量构成及水分利用效率的影响

表 3 为不同颜色地膜覆盖下向日葵的产量构成因素及产量, BM、TM 处理的盘径、空秕率、百粒质量及产量均优于 NM 处理。BM 处理的空秕率相比于 TM、NM 处理分别降低了 7.7%、12.7%; BM 处理的百粒质量比 TM、NM 处理分别高 6.0%、18.8%; BM、TM 处理的产量分别比 NM 处理高 51.8%、50.1%, BM、TM 处理覆盖条件下向日葵产

量没有显著性差异，透明膜覆盖处理产量略小于覆黑膜处理。故覆黑膜条件下向日葵产量和百粒质量最高、空秕率最低。不同处理的水分利用效率 BM 处理 > TM 处理 > NM 处理，2 种覆膜处理下水分利用效率分别比不覆膜处理增加 49.7%、48.9%，但 BM 处理和 TM 处理间无显著差异。

表 3 不同颜色覆膜下向日葵产量及其组成、水分利用效率

Table 3 Sunflower yield, its composition and water use efficiency of different color film mulches

处理	盘径/cm	空秕率/%	百粒质量/g	单株产量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	ET _a /mm	WUE/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
BM	20.8±0.3ab	14.9±4.8a	23.6±0.3a	151±2a	4 791±85a	346.0±25.5a	13.9±0.2a
TM	21.3±0.6a	16.3±2.7a	22.2±1.7a	150±8a	4 737±454a	344.1±20.9a	13.8±1.3a
NM	19.4±0.5b	17.1±3.0a	19.8±1.0a	100±5b	3 155±286b	341.3±28.1a	9.3±0.8b

3 讨论

3.1 覆膜对土壤水热盐的影响

本研究中，地膜覆盖显著提高了向日葵苗期和现蕾期 0~15 cm 土层的土壤温度，TM 处理和 BM 处理分别比 NM 处理高 5.3~9.0 °C 和 2.9~5.8 °C，与杨世佳等^[20]研究结果基本一致：透明地膜和黑色地膜均能够增加玉米土壤温度。覆膜显著提高土壤温度的主要原因是薄膜隔绝了土壤与外界的水分交换，减少了潜热交换损失，增加土壤的热通量^[21]。TM 处理比 BM 处理高 1.3~3.5 °C，透明地膜较黑色地膜增温效果更明显，因为透明膜的透光率和热辐射率达 90% 以上，土壤可以直接吸收大量太阳辐射，而黑膜透光率仅 1%~3%，热辐射率仅 30%~40%^[22]，大部分太阳辐射被薄膜吸收后通过辐射和对流散失在大气中，所以黑膜覆盖下土壤温度相对较低，甚至在高温时比不覆膜下的土壤温度还低。开花期是向日葵生育期内气温最高的时期，此时 BM 处理 < NM 处理 < TM 处理。0~15 cm 土层 BM 处理比 NM 处理低 0.5~1.3 °C，比 TM 处理低 4.3~5.3 °C，相比于不覆膜，高温时覆黑膜降低了土壤温度。Mo 等^[23]研究结果与本研究一致，黑色地膜覆盖降低高温季节旺盛生长期中午前后 0~10 cm 的土壤温度，缓解玉米生长后期的热胁迫，降低最高土壤温度，相反覆盖透明膜表层土壤温度增加。灌浆一成熟期，TM 处理 > BM 处理 > NM 处理，作物生长旺盛，植被覆盖度高，叶片遮挡了阳光对土壤的照射，不同处理间土壤温度差异很小，覆膜对土壤温度没有显著影响。

覆膜通过阻断近地面层与大气之间直接进行气流交换，阻挡水分的蒸发散失，王青松等^[24]研究发现整个生育期黑膜、透明膜的土壤蒸发量相比于不覆膜分别降低了 33.2% 和 28.4%。不同颜色地膜的温度效应不同，进而对土壤含水率影响不同。本研究结果表明灌水前（土壤基质势接近 -20 kPa 时），0~20 cm 土层土壤含水率表现为 BM 处理 > TM 处理 > NM 处理，BM、TM 处理分别比 NM 处理高 21.3%、10.6%，BM 处理比 TM 处理高 9.8%，与文

献^[25-26]研究结果相似：覆膜相比不覆膜显著提高土壤含水率，黑膜比透明膜保留更多的土壤水分，但没有显著差异。产生这种结果的原因可能是水分运动受土壤温度变化影响，以液态和气态 2 种状态运动，透明膜覆盖下土壤温度高，水分扩散率大，表层土壤水分多以水汽形式向四周扩散，而黑膜增温作用弱，且在高温时有一定的降温效应，能减少水汽扩散。但也有研究得出不同的结果，Sun 等^[27]、Ashrafuzzaman 等^[28]研究结论是透明膜覆盖下土壤含水率比黑膜高，可能是由于温度在 1 d 之内和作物整个生育期都存在较大变化，不同时期温度不同导致土壤水分的运移和再分布结果不同。

盐分溶解在水中并随之迁移，土水势梯度下的水分运动导致盐分运动变化，土壤中溶解在水中的盐分随液态水的不断汽化在土壤表层大量累积^[29]。不覆膜条件下大量水分蒸发散失导致盐分在土壤表面聚积，覆膜条件下地膜阻挡水分蒸发，水汽饱和后凝结成水珠附着在膜上再滴入土体，有助于降低表层土壤的含盐量。本试验中 BM 处理和 TM 处理 0~10 cm 土层土壤全盐量分别比 NM 处理低 51.6%~81.7% 和 28.9%~80.5%，表明覆膜能明显缓解盐碱地表层 0~10 cm 土层的盐分累积；10 cm 以下土层不同处理间土壤全盐量差异小，整个生育期不同处理 0~20 cm 土层土壤全盐量增加，20~100 cm 土层土壤盐分向上运移，全盐量均不同程度降低。说明温度势梯度对水盐运动的影响范围不超过 10 cm^[29]。Sedaghati 等^[30]研究发现，覆膜降低土壤表面 30.8%~51.8% 的土壤盐分。Zhao 等^[11]研究表明，向日葵收获后，0~20 cm 土层土壤含盐量比不覆膜平均降低了 36.5%。整个生育期 BM 处理 0~10 cm 土层土壤全盐量较 TM 处理不显著降低 4.1%~36.2%。

3.2 覆膜对作物产量和水分利用效率的影响

不同颜色地膜覆盖对土壤温度和表层水盐量均有显著影响，水、热和盐分共同作用对作物生长和产量产生影响。温度效应会影响向日葵种子的发芽出苗、干物质积累和籽粒质量^[31]。盐分也是影响向日葵生长和产量的重要因素^[32]，植物根系盐分高会

降低外部溶液渗透势,抑制生物量的生长和积累,使植物难以充分利用水分和养分^[16],进而影响籽粒灌浆。地膜覆盖可以很大程度地调节水分和盐分在作物根层土壤中的分布,为作物生长提供良好的水盐环境,进而提高水分利用效率和作物产量^[33]。本试验中 BM、TM 处理的产量分别比 NM 处理高 51.8%、50.1%,BM、TM 处理的 WUE 比 NM 处理高 49.7%、48.9%。BM 处理与 TM 处理之间产量和 WUE 没有显著差异。与 He 等^[34]研究结果相似,黑膜、透明膜覆盖下 ET_a 没有显著差异,但与不覆盖相比显著提高了作物的水分利用效率。Agele 等^[35]通过试验发现,覆黑膜能显著增加向日葵的根冠生物量和叶面积发育。路海东等^[36]研究发现,黑色地膜覆盖作物水分利用效率平均较透明地膜和不覆膜处理高 4.8%和 34.2%。Sedaghati 等^[30]也发现覆盖处理的表现更好,但透明膜和黑膜覆盖在产量上没有显著差异。说明地膜覆盖能有效提高作物产量,但是黑膜和透明膜覆盖对作物产量影响差异不显著。

4 结论

1) 透明膜处理和黑膜处理显著提高了向日葵苗期和现蕾期 0~15 cm 土层土壤温度;开花期时气温最高,0~15 cm 土层黑膜处理下土壤温度最低;灌浆-成熟期透明膜处理 > 黑膜处理 > 不覆盖处理,覆膜对土壤温度的影响降低,但 3 个处理间差异不显著。

2) 覆膜显著提高 0~20 cm 土层土壤含水率,黑膜覆盖下土壤含水率略高于透明膜覆盖。

3) 黑膜、透明膜处理显著降低 0~10 cm 土层土壤全盐量,黑膜抑盐效果略好于透明膜。10 cm 以下土层整个生育期含盐量波动明显减小,不同覆膜处理间没有显著差异。

4) 地膜覆盖可以显著提高向日葵的产量、水分利用效率,增加盘径、降低空秕率。黑膜处理增产效果略好于透明膜处理,产量最高。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] WICKE B, SMEETS E, DORNBURG V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(8): 2 669-2 681.
- [2] 杨劲松,姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. *土壤与农业生产*, 2015, 30(Z1): 257-265.
YANG Jinsong, YAO Rongjiang. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. *Soil and Agriculture*, 2015, 30(Z1): 257-265.
- [3] LÄUCHLI A, GRATTAN S R. Plant growth and development under salinity stress[M]. *Advances in Molecular Breeding Toward Drought*

- and Salt Tolerant Crops. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.
- [4] ZHAO Y G, PANG H C, WANG J, et al. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 16-25.
- [5] 孔东,史海滨,霍再林,等. 河套灌区不同盐分含量土壤对向日葵生长的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(S1): 414-416.
KONG Dong, SHI Haibin, HUO Zailin, et al. Effects on growth of sunflower under different saline soils in the Hetao irrigation area[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(S1): 414-416.
- [6] 岳云. 盐胁迫对油葵生理生态指标及吸盐效果的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
YUE Yun. The research on the salt stress to physiological ecology indexes and the effects of absorption for the salt of oil sunflower[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.
- [7] 张殿发,郑琦宏,董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(6): 14-18.
ZHANG Dianfa, ZHENG Qihong, DONG Zhiying. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(6): 14-18.
- [8] GHOSH P K, DAYAL D, BANDYOPADHYAY K K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. *Field Crops Research*, 2006, 99(2/3): 76-86.
- [9] 杨湘,苏学德,李鹏程,等. 不同覆盖物对夏黑葡萄关键生育期土壤温度和土壤水势的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(20): 59-65.
YANG Xiang, SU Xuode, LI Pengcheng, et al. Effects of different mulch on soil temperature and soil water potential in key growth stages of summer black grape[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(20): 59-65.
- [10] 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.
- [11] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 363-370.
- [12] DONG H Z, LI W J, TANG W, et al. Early plastic mulching increases stand establishment and lint yield of cotton in saline fields[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 269-275.
- [13] 张德奇,廖允成,贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 208-213.
ZHANG Deqi, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1): 208-213.
- [14] 王青松. 覆膜颜色与灌水量对河套灌区春玉米生长及农田蒸散发特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG Qingsong. Effects of film mulching color and irrigation on spring maize growth and evapotranspiration characteristics in the Hetao irrigation district[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [15] 张琴. 不同颜色地膜覆盖对玉米土壤水热状况及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(4): 57-61.
ZHANG Qin. Effects of different color film mulching on soil moisture-heat and yield of maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(4): 57-61.
- [16] ZENG W Z, XU C, WU J W, et al. Impacts of salinity and nitrogen on the photosynthetic rate and growth of sunflowers (*Helianthus annuus* L.)[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 635-644.

- [17] 葛敬路. 河套灌区不同地下水埋深条件下土壤水盐运移定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
GE Jinglu. Quantitative analysis of soil water and salt migration at different groundwater level in Hetao irrigation district[D]. Beijing: China Agricultural university, 2020.
- [18] SMITH M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- [19] LI Y, HUANG G H, CHEN Z J, et al. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107-277.
- [20] 杨世佳, 陈瑾, 张毅, 等. 不同颜色地膜覆盖对玉米土壤温度、杂草发生及玉米产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(22): 92-96.
YANG Shijia, CHEN Jin, ZHANG Yi, et al. Effects of different color film mulching on soil temperature, weed occurrence and yield of maize[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(22): 92-96.
- [21] 董瑜皎. 覆膜综合栽培技术对西南丘陵区水稻产量、土壤水热过程和作物氮素利用的影响机理[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
DONG Yujiao. Effects of integrated plastic mulch rice management on yield, soil temperature and water content, and crop nitrogen use in the hilly area of Southwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019.
- [22] 赵晓. 种植模式与氮肥类型对冬小麦生长及水氮利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
ZHAO Xiao. Effect of planting patterns and types of nitrogen fertilizer on growth and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [23] MO F, WANG J Y, ZHOU H, et al. Ridge-furrow plastic-mulching with balanced fertilization in rainfed maize (*Zea mays* L.): An adaptive management in East African Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 236: 100-112.
- [24] 王青松, 冯浩, 董勤各, 等. 地膜覆盖对河套灌区春玉米耗水结构及水分利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 10-18.
WANG Qingsong, FENG Hao, DONG Qingge, et al. The effectiveness of mulching in improving water use efficiency of spring maize in Hetao irrigation district varied with types of plastic films[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 10-18.
- [25] LIU Q F, CHEN Y, LI W W, et al. Plastic-film mulching and urea types affect soil CO₂ emissions and grain yield in spring maize on the Loess Plateau, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28 150.
- [26] ALI Sardaş M, KAPUR B, ÇELIKTOPUZ E, et al. Land productivity, irrigation water use efficiency and fruit quality under various plastic mulch colors and irrigation regimes of strawberry in the Eastern mediterranean region of Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106-568.
- [27] SUN S J, CHEN Z J, JIANG H, et al. Black film mulching and plant density influencing soil water temperature conditions and maize root growth[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-12.
- [28] ASHRAFUZZAMAN M, HALIM M A, ISMAIL M R, et al. Effect of plastic mulch on growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2011, 54(2): 321-330.
- [29] 李毅. 覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
LI Yi. Experimental studies on the coupled movement of soil water, salt, and heat transfer under plastic mulch[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002.
- [30] SEDAGHATI N, ALIZADEH A, ANSARI H, et al. Study of changes in soil moisture and salinity under plastic mulch and drip irrigation in pistachio trees[J]. *Journal of Nuts*, 2016, 7(1): 21-33.
- [31] 陈建忠, 张焕英. 气象因素对向日葵生长发育和产量的影响[J]. *中国农业气象*, 1997, 18(5): 15-18.
- [32] TORABIAN S, ZAHEDI M, KHOSHGOFTAR A H. Effects of foliar spray of two kinds of zinc oxide on the growth and ion concentration of sunflower cultivars under salt stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(2): 172-180.
- [33] DANG J, LIANG W L, WANG G Y, et al. A preliminary study of the effects of plastic film-mulched raised beds on soil temperature and crop performance of early-sown short-season spring maize (*Zea mays* L.) in the North China Plain[J]. *The Crop Journal*, 2016, 4(4): 331-337.
- [34] HE G, WANG Z H, HUI X L, et al. Black film mulching can replace transparent film mulching in crop production[J]. *Field Crops Research*, 2021, 261: 108 026.
- [35] AGELE S, OLAORE J, AKINBODE F A. Effect of some mulch materials on soil physical properties, growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus*, L)[J]. *Advances in Environmental Biology*, 2010, 4: 368-375.
- [36] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(7): 1 997-2 004.
LU Haidong, XUE Jiquan, HAO Yinchuan, et al. Effects of black film mulching on soil environment and maize growth in dry land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 1 997-2 004.

Effects of Plastic Mulch Film Color on Moisture-heat-salt and Water Use Efficiency of Sunflower in Saline-alkali Land

ZHANG Yujie^{1,2}, WANG Ning^{1,3}, YANG Bin¹, WANG Fengxin^{1*}

(1. China Agricultural University, College of Water Resources and Civil Engineering, Beijing 100083, China;

2. Beijing Water Planning Institute, Beijing 100048, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: **【Objective】** Utilization of plastic-film mulching is a widespread practice in regions with limited water resources. However, the impact of mulch film color on soil thermal condition, moisture level, salinity, as well as their implications for crop growth in saline-alkali soil remains elusive. This paper aims to bridge this knowledge gap through experimental investigation. **【Method】** The field experiment was carried out a sunflower field in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia with three treatments: black plastic film (BM), transparent plastic film (TM); no-mulching was taken as the control (NM). **【Result】** Both BM and TM mulching films significantly increased the temperature of the 0~15 cm soil layer at the seedling and budding stages of the sunflower by 2.9~5.8 °C and 5.3~9.0 °C, respectively. When the soil water matric potential was close to -20 kPa, BM and TM mulching increased the soil moisture content in the 0~20 cm soil layer by 21.3% and 10.6%, respectively, over the NM. Compared to NM, BM and TM mulching reduced soil salinity in the 0~10 cm soil layer by 51.6%~81.7% and 28.9%~80.5%, respectively, over the whole growing season; they also increased the seed yield by 51.8% and 50.1%, and water use efficiency by 49.7% and 48.9%, respectively. Black film mulching affected soil moisture, salt content and crop yield slightly more than the transparent film mulching, but the differences were not significant. **【Conclusion】** Compared with NM, black and transparent film mulching both improved soil moisture in the root zone and reduced salt accumulation in the soil surface, thereby improving yield and water use efficiency of the sunflower. Black film mulching worked slightly better than transparent film mulching though no significant difference was found between them.

Key words: film; saline-alkali soil; salinity; temperature; sunflower

责任编辑: 赵宇龙