

作物水肥高效利用

文章编号: 1672-3317(2023)03-0014-12

## 不同灌溉方式对大豆耗水 and 水分利用效率的影响

郭振宇<sup>1,2</sup>, 杨丹妮<sup>1,2</sup>, 杨晓琳<sup>1,2\*</sup>, 李思恩<sup>1,2</sup>, 王春雨<sup>1,2</sup>, 张云轩<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站, 甘肃 武威 733009)

**摘要:**【目的】研究不同灌溉方式对大豆全生育期耗水量及水分利用效率的影响, 为大豆节水栽培提供科学依据。

【方法】于2021年在甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站开展试验, 设置了膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌和无膜畦灌4种灌溉方式, 每块试验田中心布设一台波文比-能量平衡系统对大豆全生育期的水热通量进行连续定位观测, 研究了不同灌溉方式对大豆的农田小气候, 生长发育, 耗水量(ET), 产量以及水分利用效率(WUE)的影响。【结果】①覆膜对比无膜提高大豆净辐射(Rn) 6.58 W/m<sup>2</sup>, 同时滴灌对比畦灌提高土壤温度 1.30 °C。②覆膜和滴灌2种措施在不同程度上对大豆的生理指标产生影响。与无膜相比, 覆膜显著提高叶面积指数(LAI) 18.29%; 但畦灌比滴灌 LAI 高 5.45%。③覆膜和滴灌均可显著降低大豆全生育期 ET, 膜下滴灌对比其他3种处理全生育期 ET 最小, 仅为 378.92 mm。④4种灌溉方式下, 环境因子和生物因子中与 ET 正相关性最显著的分别为 Rn 和 LAI。⑤膜下滴灌比无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌各增产 18.07%、5.27%、11.17%。同种灌溉方式下覆膜使 WUE 平均显著提高 25.93%; 同种覆膜条件下滴灌使 WUE 平均显著提高 34.62%, 膜下滴灌的 WUE 比无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌分别显著提高 31.15%、42.86%、70.21%。【结论】膜下滴灌比无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌的产量平均提高了 11.51%, ET 平均减少了 24.13%, 同时 WUE 平均提高了 48.07%, 灌溉水利用效率平均提高了 46.57%; 综合考虑作物的耗水、产量、WUE, 膜下滴灌对大豆生长提供了更适宜的生长环境并具有明显的节水增产作用。

**关键词:** 滴灌; 覆膜; 产量; 水分利用效率; 大豆

中图分类号: S565.1; S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022445

OSID:



郭振宇, 杨丹妮, 杨晓琳, 等. 不同灌溉方式对大豆耗水 and 水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 14-25.  
GUO Zhenyu, YANG Danni, YANG Xiaolin, et al. Water Consumption and Water Use Efficiency of Soybean Are Impacted by Irrigation Method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 14-25.

### 0 引言

【研究意义】我国大豆总产量低, 进口依存度高, 是粮食安全战略中最为脆弱的一环<sup>[1-3]</sup>。2020年甘肃省大豆种植面积约 4.7 万 hm<sup>2</sup>, 不足全国大豆种植面积的 0.5%<sup>[4]</sup>, 但甘肃省光热资源丰富, 适宜大豆生长, 对提高大豆产能具有巨大潜力。然而西北地区水资源短缺, 严重制约着当地作物的产量提升及当地农业的可持续发展<sup>[5]</sup>。覆膜和滴灌等农艺措施因其良好的节水增温保墒效果在当地被广泛应用。然而目前对覆膜和滴灌的研究多集中在玉米和马铃薯等作物, 对大豆的研究相对较少。【研究进展】在玉米和

马铃薯的研究中, Zhao 等<sup>[6]</sup>研究表明与不覆膜玉米相比, 覆膜玉米土壤蒸发和蒸散量分别降低了 60.7% 和 10.1%, 产量和水分利用效率(WUE)分别提高了 38.9% 和 54.3%; Wang 等<sup>[7]</sup>发现滴灌与畦灌相比, 玉米的 WUE 可提高 13.9%~39.2%; 韩翠莲等<sup>[8]</sup>发现膜下滴灌马铃薯产量分别较无膜滴灌、沟灌和漫灌处理增加了 10.6%、29.8% 和 58.7%。有关大豆的研究, 武淑娜等<sup>[9]</sup>得出地膜覆盖对比露地无覆盖可使大豆产量和 WUE 分别提高 27.45% 和 28.22%; 周德录等<sup>[10]</sup>报道地膜覆盖在半湿润偏旱区效果最优, 大豆的产量和 WUE 较露地无覆盖可分别提高 58.5% 和 65.9%; 王立明等<sup>[11]</sup>研究认为全膜覆盖条件下采用沟播可提高大豆各生育阶段株高、叶面积指数和干物质积累量; 同时连续 4 a 对比露地无覆盖平播, 全膜覆盖可提高大豆产量和 WUE 约 40.9% 和 53.4%。【切入点】目前对大豆的相关研究主要集中在覆膜与无膜的对比研究中, 对覆膜和滴灌这 2 种方式结合之后的膜下滴灌对大豆生长发育及水分利用影响的研究相对较少, 也未

收稿日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071975, 51879262); 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站开放课题(KF2021002); 甘肃内陆河区农田水碳通量监测与节水固碳减排潜力评估项目(21JR7RH897)

作者简介: 郭振宇(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事农田水热通量研究。

E-mail: guozhenyu@cau.edu.cn

通信作者: 杨晓琳(1986-), 女, 副教授, 主要从事节水种植制度研究。

E-mail: yangxiaolin429@cau.edu.cn

能很好地量化由于灌溉方式转变对大豆生长发育、耗水以及水分利用效率的影响；同时，前人的研究大都是小区传统测定试验，鲜少有试验利用波文比-能量平衡系统对大豆生育期水热通量进行连续监测。波文比系统可对田间作物进行长期连续定位观测，记录 10 min 尺度的数据，更便于对不同处理的作物生育期内不同时间段的耗水情况进行连续观测与对比分析。另外，波文比仪器还可对大豆试验地的辐射、空气温湿度、土壤温湿度等农田小气候指标进行原位连续观测，为更加深入的机理分析提供了条件。【拟解决的关键问题】本研究通过设置膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌和无膜畦灌 4 种灌溉方式的大豆对比试验，利用波文比-能量平衡系统等进行连续观测，分析不同灌溉方式下大豆农田小气候、生长发育进程、耗水量、产量、收获指数以及水分利用参数的差异，探究不同灌溉方式下环境和生物因素对大豆耗水的影响机制，以期揭

示膜下滴灌对大豆生产的作用，为提高农业用水效率、实现大豆稳产高产提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2021 年在甘肃武威绿洲农业高用水国家野外科学观测研究站（中国农业大学石羊河实验站，北纬 37°49′，东经 102°52′，海拔 1 586 m）进行。试验站位于典型的大陆性温带干旱气候区，年平均降水量 164 mm，年平均气温 8 °C，年积温（>0 °C）约 3 550 °C，年蒸发量约 2 000 mm，年日照时间 3 000 h 以上。该地区地下水位位于地面以下 40~50 m<sup>[12]</sup>。试验区土质为沙壤土，2021 年全大豆生育期内降水量为 154.6 mm，试验地（0~40 cm）土壤理化参数和基础无机氮量见表 1。

表 1 试验地耕层（0~40 cm）土壤理化参数和基础无机氮量

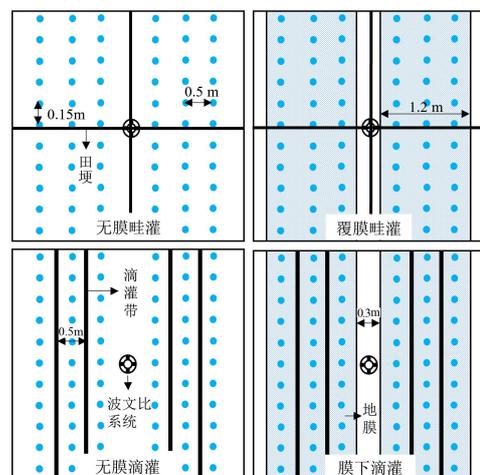
Table 1 Soil physicochemical parameters and basic inorganic nitrogen content in the cultivated layer (0~40 cm) of the experimental land

土层深度/cm	土壤干体积质量/(g cm <sup>-3</sup> )	土壤饱和含水率/(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	铵态氮量/(mg kg <sup>-1</sup> )	硝态氮量/(mg kg <sup>-1</sup> )
0~20	1.47	0.40	0.28	1.24	30.51
20~40	1.55	0.40	0.27	0.44	11.56

### 1.2 试验设计

试验对象为春大豆（陇黄 3 号），本试验设置了膜下滴灌（FD）、无膜滴灌（ND）、覆膜畦灌（FB）、无膜畦灌（NB）4 块试验田，每块试验田面积均为 50 m×50 m，在每块试验田的中心布设 1 台波文比-能量平衡系统。畦灌处理的每块试验田用田埂分为 4 等份，滴灌带和地膜采用机械化作业且同时布设，之后利用穴播机将大豆进行人工播种，每个穴中留 3~5 粒种子（具体因土壤质地和穴播机性能情况略有差异）。播种后需灌出苗水，待大豆出苗后人工间苗使每个穴保留 1 株。播种前撒施底肥（NH<sub>4</sub>）<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>（P46%、N18%）225 kg/hm<sup>2</sup>、复合肥（N18%、P18%、K18%）225 kg/hm<sup>2</sup>，之后不追肥。灌溉系统总干管为 75 mm 的 PVC 管，支干管 50 mm 的 PVC 管，支管为 50 mm 的 PE 管，毛管为滴灌带，滴灌带直径 1.6 cm，滴头流量 2 L/h，滴头间距 30 cm。膜下滴灌试验田的布置为 1 膜 2 管 3 行，膜宽 1.2 m，滴灌带的间距为 0.5 m，膜间裸土宽度 30 cm。大豆株距 15 cm，行距 50 cm，种植密度为 13.3 万株/hm<sup>2</sup>，其他 3 个处理的大豆种植间距与膜下滴灌处理保持一致。试验布置如图 1 所示。滴灌由于灌水时水分可以直接到达大豆根系，且灌水时无需投入过多人力，因而采用“少量多次”的灌水方式，而畦灌由于灌水以面源下渗，无效蒸发较多需多于滴灌灌水量才能满足作物需水，又加上灌水时需消耗大量人力，因而采用“多量少次”的灌水方式。

试验中灌水时间主要分布在大豆快速生长的花荚期和鼓粒期，灌水量是以满足作物需水量为前提综合考虑灌溉方式的特性后制定，这与王巧娟等<sup>[13]</sup>以及 Zhang 等<sup>[14]</sup>研究中的灌水时间和灌水量几乎一致。此外西北地区降水较少，在 2021 年整个生育期日降水量超过 10 mm 的仅 2 d，一般不会对灌溉计划产生影响，而当降水超过 15 mm 以及出现大风等恶劣天气时，会适当推迟灌溉。2021 年春大豆灌溉制度如表 2 所示。



注 点状填充是地膜，在膜下滴灌进行了标注；  
十字黑线是田埂，在无膜畦灌进行了标注。

图 1 试验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental layout

表 2 不同灌溉方式下的灌水日期及灌水量

Table 2 Irrigation date and amount under different irrigation methods

处理	灌溉时间	单次灌水量/mm
膜下滴灌	0614, 0630, 0716, 0731, 0818	35.2
无膜滴灌	0614, 0630, 0716, 0731, 0818	35.2
覆膜畦灌	0613, 0716, 0817	87.0(97.8)
无膜畦灌	0614, 0716, 0818	87.0(97.8)

注 括号里的单次灌水量数值代表有横线标注的灌溉时间对应的灌水量。

表 3 观测仪器布设情况

Table 3 Layout of observation instruments

观测指标	传感器型号	厂商	传感器安装位置	采样频率/min
空气温湿度	HMP155	Vaisala, Vantaa, Finland	冠层上方 0.5 m 和 1 m	
土壤温度	109L	Campbell Scientific, Inc., USA	地面以下 20、40、60、80、100 cm 处	
土壤湿度	CS616	Campbell Scientific, Inc., USA	地面以下 20、40、60、80、100 cm 处	10
土壤热通量	HFP01	Hukseflux, Netherlands	覆膜处理膜下、裸土各放置一块, 距地表 5 cm 无膜处理放置在行间, 距地表 5 cm	
辐射四分量	CNR4	Kipp&Zonen, Netherlands	冠层上方 1.5 m	

由近地层梯度扩散理论, 单位时间内因湍流交换产生的潜热通量 ( $LE$ )、感热通量 ( $H$ ) 与垂直方向上的温度和水汽压相互关系为:

$$LE = -\rho_a \lambda K_w \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (1)$$

$$H = -\rho_a C_p K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (2)$$

式中:  $LE$  为潜热通量 ( $W/m^2$ );  $H$  为感热通量 ( $W/m^2$ );  $\lambda$  为水的汽化潜热 ( $J/kg$ );  $\rho_a$  为空气密度 ( $kg/m^3$ );  $C_p$  为空气的定压比热 ( $J/(kg \cdot K)$ );  $K_w$  和  $K_h$  分别为潜热和感热湍流交换系数 ( $m^2/s$ );  $\partial q/\partial z$  和  $\partial \theta/\partial z$  分别表示近地层空气比湿梯度 ( $1/m$ ) 和位温梯度 ( $^{\circ}C/m$ )。假设下垫面潜热和感热湍流交换具有相似性, 根据雷诺相似性原理,  $K_w \approx K_h$ , 则波文比可表示为:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta T$  为不同高度的温度差 ( $^{\circ}C$ );  $\Delta e$  为不同高度的水汽压差 ( $kPa$ );  $\gamma$  为湿度计常数 ( $kPa/^{\circ}C$ )。

由以上公式可得:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta}, \quad (4)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta}. \quad (5)$$

采用波文比与能量平衡系统观测 2 个垂向不同位置的温度、水汽压, 配合净辐射通量及土壤热通量观测数据, 带入上述公式可计算得  $\beta$ 、 $LE$  和  $H$ , 耗水

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 波文比-能量平衡系统

每块试验田的中心各安装了 1 台波文比-能量平衡系统 (BREB), 用以对大豆全生育期内的水热通量进行长期连续定位观测。仪器的各项观测指标所用到的探头型号及布设位置见表 3, 4 台仪器安装的探头型号和位置完全一致。

量 ( $ET$ ) 则通过  $LE$  进行转化, 转换公式为:

$$ET = 0.0864 \frac{LE}{\lambda}, \quad (6)$$

式中:  $ET$  为蒸散强度 ( $mm/d$ )。

Perez 等通过数学和物理分析研究发现  $\Delta T$ 、 $\Delta e$  与  $\beta$  及  $(R_n - G)$  之间存在相互制约的关系, 并利用  $LE$  和  $H$  能量传输方向存在的制约关系进行数据的取舍<sup>[16]</sup>, 然后对不合格的数据进行插补, 对于 3 h 以内的缺失值, 利用线性插值进行插补, 对于更长序列的缺失数据, 根据前后 3 天相应时刻的平均值进行插补<sup>[17]</sup>。

在获取连续且完整的观测数据之后, 对仪器数据进行了一致性和可比性检验。图 2 为休耕期及生育期内的部分时间的净辐射和向下短波随时间变化的规律图。因为波文比系统属于蓄电池供电, 无膜畦灌田的波文比仪器因供电问题导致休耕期数据部分缺失, 故我们在休耕期仅对膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌 3 个处理下的波文比数据进行比对, 结果如图 2 (a) 所示。根据图 2 (a) 可以看出, 休耕期内 3 块试验田中波文比系统观测得到的净辐射基本一致。进一步对大豆生育期内 4 块试验田波文比系统观测得到的向下短波辐射与试验站内气象站观测得到的数据进行了比对, 结果如图 2 (b) 所示。根据图 2 (b) 可以看出, 生育期内 4 块试验田中波文比系统观测到的向下短波辐射基本一致, 并与气象站数据吻合。综上所述, 4 台波文比系统具有良好的一致性和可比性。

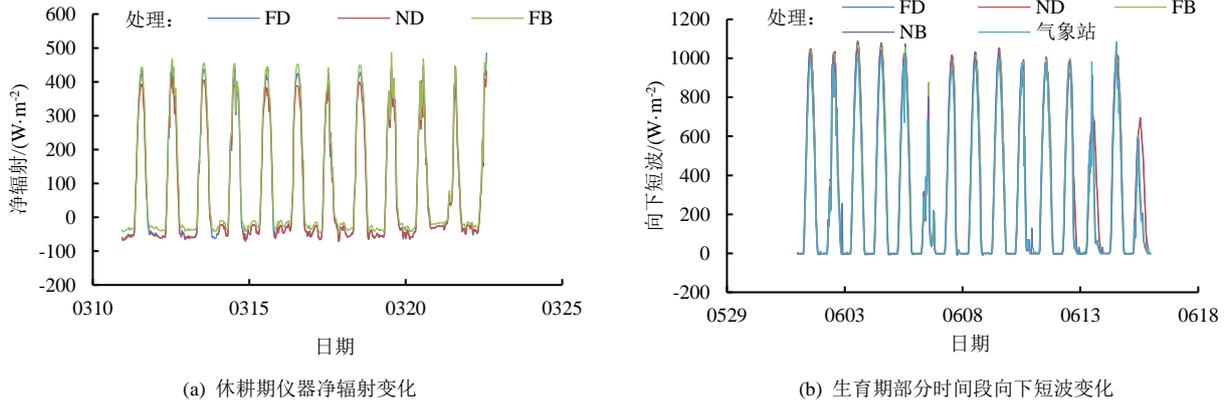


图 2 波文比系统的一致性和可靠性验证

Fig.2 Consistency and reliability verification of Bowen ratio system

已有研究证明波文比-能量平衡法计算  $ET$  的可行性<sup>[18]</sup>，本试验所采用的波文比-能量平衡系统已进行过可靠性验证<sup>[5]</sup>，在此基础上本文利用水量平衡法计算了  $ET$  并与波文比-能量平衡法测定的  $ET$  进行了对比验证。本研究将波文比-能量平衡法计算的 10 d 耗水之和 ( $ET_{BREB}$ ) 与相应日期的水量平衡法计算的耗水之和 ( $ET_{WB}$ ) 进行比较，结果如图 3 所示。研究表明  $ET_{BREB}$  与  $ET_{WB}$  具有良好的一致性，因此波文比-能量平衡系统可以准确估算大豆的  $ET$ 。

评价指标决定系数  $R^2$ 、标准均方根误差  $nRMSE$  和一致性指数  $IA$  计算式为：

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}, \quad (7)$$

$$nRMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n\bar{M}^2}}, \quad (8)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - M_i| + |\bar{M} - M_i|)^2}, \quad (9)$$

式中： $M_i$  表示水量平衡法计算的  $ET_{WB}$  (mm)； $S_i$  表示波文比-能量平衡法计算的  $ET_{BREB}$  (mm)； $\bar{M}$  表示水量平衡法计算的  $ET_{WB}$  的平均值； $\bar{S}$  表示波文比-能量平衡法计算的  $ET_{BREB}$  的平均值。

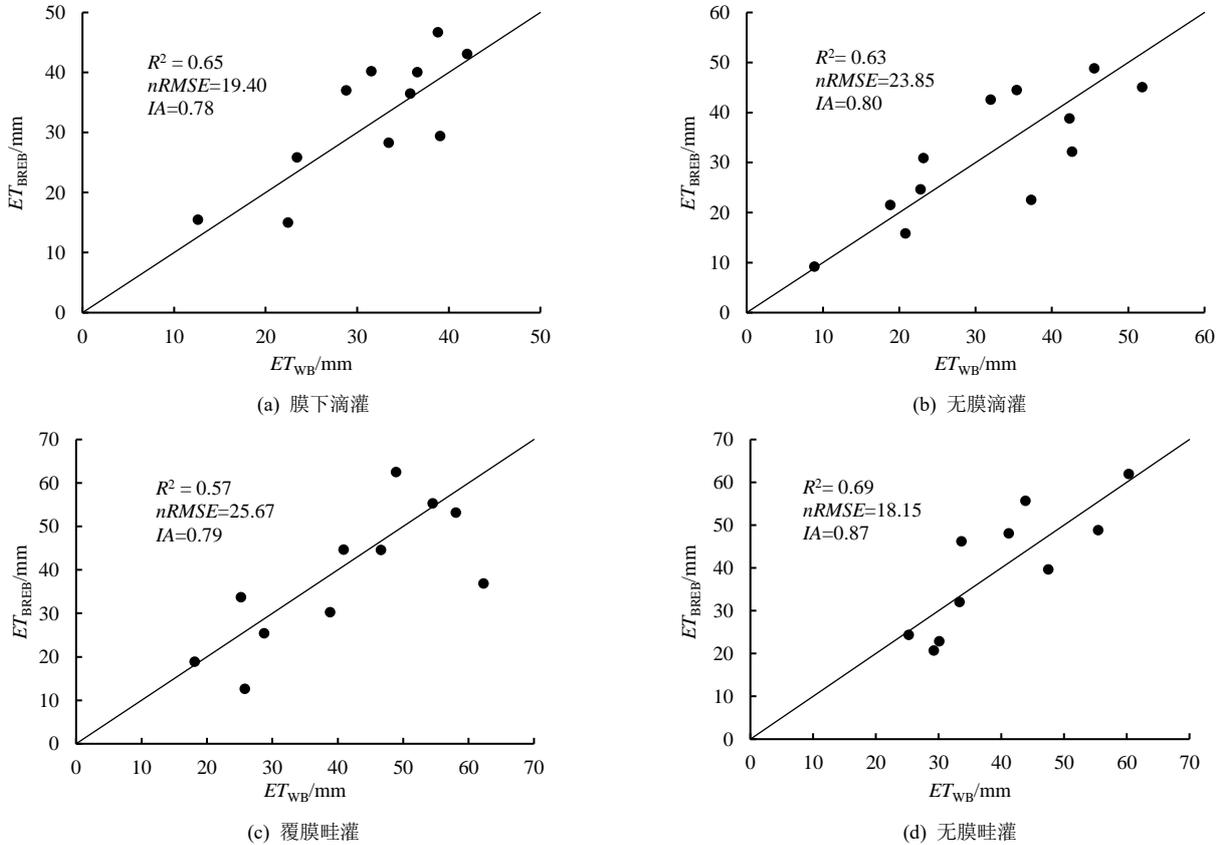


图 3 4 种处理波文比-能量平衡法与水量平衡法估算的 10 d 蒸散之和的对比

Fig.3 Comparison of the sum of ten-day evapotranspiration estimated by Bowen ratio-energy balance method and water balance method for four treatments

### 1.3.2 生长指标及产量的测定

春大豆测定的生长指标主要包括冠层高度、主茎节数、叶片数、叶长、叶宽、根瘤数、叶绿素量, 取样间隔时间为 10 d 左右, 并在每种处理的试验田取长势均匀的 6 株植株, 使用卷尺测定地面以上至顶部生长点位置的高度为冠层高度; 采用人工计数的方法记录主茎节、叶片以及根瘤的数量; 在苗期和成熟期用卷尺测量所有叶片的叶长和叶宽, 生育中期取每一个三小叶中的一个叶片测量叶长和叶宽, 同时利用叶绿素仪 (SPAD-502plus) 测定叶绿素量。之后将每株大豆分根、茎、叶、果 4 个部分, 分别装入档案袋, 105 °C 杀青 1 h, 然后在 85 °C 下烘干至恒质量, 用精度为 0.01 g 的天平称量生物量。在收获时, 将每个处理取 9 个 1 m<sup>2</sup> 的样方, 并分别将样方内的大豆进行脱粒晾晒, 用精度为 0.01 g 的电子天平称量大豆籽粒, 以获取各个处理的大豆产量数据。

叶面积指数 (*LAI*) [19] 的计算式为:

$$LAI=0.74 \times \frac{n \times \bar{L}_i \times \bar{W}_i}{D \times S}, \quad (10)$$

式中: *LAI* 为叶面积指数 (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>);  $\bar{L}_i$  和  $\bar{W}_i$  分别是所测叶片的叶长平均值 (m) 和叶宽平均值 (m); *n* 为单株大豆的叶片数; *D* 和 *S* 分别是行距和株距 (m)。

冠层覆盖度 (*Cc*) 表示绿色冠层覆盖地面土壤的面积的比例 [13], *Cc* 是由 *LAI* 计算而来, 计算式为:

$$Cc=1.005(1-e^{-0.6 \cdot LAI})^{1.2}. \quad (11)$$

收获指数 (*HI*) 的计算式为:

$$HI=\frac{Y}{B}, \quad (12)$$

式中: *Y* 为产量 (kg/hm<sup>2</sup>); *B* 为地上部生物量 (kg/hm<sup>2</sup>); 即茎、叶、果的生物量总和。

### 1.3.3 水分利用参数

水分利用效率 *WUE* (kg/m<sup>3</sup>) 和灌溉水利用效率 *IWUE* (kg/m<sup>3</sup>) 计算式为:

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

$$IWUE=\frac{Y}{I}, \quad (14)$$

式中: *Y* 为产量 (kg/hm<sup>2</sup>); *ET* 为耗水量 (mm); *I* 为灌水量 (mm)。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 IBM SPSS Statistics 22 进行数据统计分析和绘图, 采用 Origin 2021 进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 大豆田的农田小气候

4 种处理大豆全生育期内的平均净辐射 (*Rn*)、地表反射率、平均上层空气温度 (*Ta-up*)、平均下层空气温度 (*Ta-down*)、平均上层饱和水汽压差 (*VPD-up*)、平均下层饱和水汽压差 (*VPD-down*)、0~40 cm 平均土壤温度 (*Ts*) 以及 0~40 cm 平均土壤含水率 (*SWC*) 如表 4 所示。覆膜处理下的 *Rn* 比无膜处理平均高 6.58 W/m<sup>2</sup>, 滴灌处理下的 *Rn* 比畦灌处理平均低 4.00 W/m<sup>2</sup>, 此时膜下滴灌的 *Rn* 略低于覆膜畦灌但高于无膜畦灌和无膜滴灌, 整个生育期内 *Rn* 呈先增大后减小的趋势, 并在花荚期达到最大。4 个处理的地表反射率无明显差异, 原因可能是由于大豆苗期植株较小, 地膜覆盖以及土壤含水率均会对反射率产生影响, 随着大豆的生长发育, 枝叶掩盖了地膜的影响, 从而使得不同处理之间的反射率没有明显差异。膜下滴灌的全生育期 *Ta-up* 和 *Ta-down* 的平均值分别为 18.83 °C 和 19.13 °C 均低于另外 3 种处理, 这与膜下滴灌频繁的灌水和覆膜的保湿作用使大豆农田小气候的水汽量较高有关。滴灌处理下的 *VPD-up* 和 *VPD-down* 均高于畦灌处理, 这与滴灌处理下灌水量较少有关, 而无膜滴灌处理下 *VPD-up* 和 *VPD-down* 除了受到灌水量的影响外还因为没有地膜的保湿作用, 所以数值上均高于其他处理。滴灌的 *Ts* 在大豆不同的生育期中均高于畦灌处理, 这与滴灌少量多次的灌水方式有关, 同时研究发现在大豆生育前期 (苗期和分枝期), 覆膜处理的 *Ts* 要高于无膜处理, 原因主要是覆膜后土壤蒸发减少, 空气感热与土壤热通量增加, 即为地膜覆盖的“增温效应” [6]。然而, 本文还发现, 地膜覆盖后大豆长势明显优于不覆膜处理, 其叶面积指数增加 15%~20%, 因此在大豆生育中后期, 地膜覆盖的大豆蒸发耗水更多, 冠层截光能力更强, 使土壤获取的辐射更少, 因此, 在大豆生育中后期覆膜处理土壤温度较不覆膜处理偏低。由于滴灌灌水量远低于畦灌, 因此, 膜下滴灌和无膜滴灌处理的 *SWC* 均低于覆膜畦灌、无膜畦灌处理。春大豆在不同灌溉方式下的农田小气候中的各生育时期情况如表 5 所示。结果表明 4 种处理生育期从长到短分别是膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌; 滴灌和覆膜对生育期长短的影响主要体现在大豆生育后期, 这表明膜下滴灌下的农田小气候促进了大豆的生长发育, 在一定程度上加速了大豆的生长, 缩短了大豆的生育期。

表 4 大豆生育期各阶段及全生育期农田小气候各指标的平均值

Table 4 Mean values of agricultural microclimate indicators at different growth stages and the whole growth period of soybean

生育期	$Rn/(W \cdot m^{-2})$				地表反射率				$Ta-up/^{\circ}C$				$Ta-down/^{\circ}C$			
	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB
苗期	118.38	114.80	125.14	113.75	0.21	0.21	0.22	0.22	16.52	16.90	16.98	17.17	17.01	16.93	17.68	17.19
分枝期	146.67	134.92	136.97	134.34	0.20	0.20	0.19	0.19	18.62	19.23	19.21	19.31	19.08	19.30	20.58	19.42
花荚期	164.49	157.55	167.50	151.83	0.23	0.22	0.22	0.22	22.37	22.90	22.59	22.55	22.51	22.70	23.60	22.42
鼓粒期	126.91	123.36	132.75	124.13	0.22	0.22	0.23	0.22	18.55	19.06	18.82	18.49	18.67	18.90	18.59	18.23
成熟期	95.89	83.84	113.01	111.56	0.25	0.24	0.23	0.23	16.93	16.94	16.79	17.40	17.18	16.93	16.80	17.18
全生育期	133.31	127.87	138.44	130.73	0.22	0.22	0.22	0.22	18.83	19.38	19.24	19.43	19.13	19.31	19.86	19.34

生育期	VPD-up/kPa				VPD-down/kPa				$Ts/^{\circ}C$				SWC/( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )			
	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB	FD	ND	FB	NB
苗期	1.31	1.34	1.34	1.38	1.34	1.33	1.38	1.36	18.53	18.21	16.35	16.20	0.19	0.19	0.24	0.24
分枝期	1.02	1.07	1.03	1.06	1.02	1.05	1.08	1.03	22.04	21.54	19.89	19.64	0.18	0.18	0.24	0.24
花荚期	1.36	1.42	1.32	1.34	1.27	1.32	1.28	1.23	22.34	23.01	21.87	21.79	0.16	0.15	0.17	0.20
鼓粒期	0.86	0.88	0.81	0.81	0.80	0.82	0.75	0.73	18.72	19.38	17.92	18.13	0.15	0.14	0.15	0.20
成熟期	0.75	0.68	0.63	0.74	0.73	0.65	0.61	0.67	16.68	17.34	15.83	16.19	0.17	0.17	0.19	0.24
全生育期	1.09	1.14	1.08	1.12	1.06	1.09	1.07	1.06	19.96	20.24	18.64	18.97	0.17	0.16	0.20	0.22

表 5 不同灌溉方式下大豆生育期起始日期及时间

Table 5 Start date and growth duration days of soybean under different irrigation methods

生育期	膜下滴灌			无膜滴灌			覆膜畦灌			无膜畦灌		
	起始日期	终止日期	时间/d									
苗期	0501	0531	30	0501	0531	30	0501	0531	30	0501	0531	30
分枝期	0601	0627	26	0601	0627	26	0601	0627	26	0601	0627	26
花荚期	0628	0801	34	0628	0802	35	0628	0802	35	0628	0806	39
鼓粒期	0802	0831	29	0803	0902	30	0803	0902	30	0807	0906	30
成熟期	0901	0913	12	0903	0916	13	0903	0916	13	0907	0920	13
全生育期	0501	0913	135	0501	0916	138	0501	0916	138	0501	0920	142

## 2.2 大豆的生长指标及生长过程

4 种处理大豆的冠层高度 ( $Hc$ )、根瘤数、叶面积指数 ( $LAI$ ) 和冠层覆盖度 ( $Cc$ ) 随时间变化分别如图 4 所示。4 种处理下不同生长指标在全生育期的平均值见表 6。通过观察  $Hc$  随时间的变化图 (图 4 (a)), 4 种处理下  $Hc$  在生育前期从大到小的顺序为膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌, 造成这种差异的原因可能是膜下滴灌在大豆的生育前期提供了更适宜的生长环境, 加速了大豆的生长, 这也使得膜下滴灌条件下大豆的根瘤数、 $LAI$  以及  $Cc$  在生育前期均高于其他处理。覆膜畦灌的  $Hc$  在大豆生长的中后期高于其他处理可能与覆膜畦灌的大豆在这个阶段进行了大量的灌水有关。滴灌对比畦灌增加了 27 个根瘤数 (图 4 (b)), 而覆膜增加了滴灌条件下的根瘤数却减少了畦灌条件下的根瘤数, 使得膜下滴灌与覆膜畦灌的根瘤数具有显著差异, 这可能是由于膜下滴灌灌水可以直接到达大豆根系, 而覆膜进一步给大豆的根系环境提供适宜的水分, 更有利于大豆主

根系上根瘤的生长, 覆膜畦灌的灌溉水主要是通过侧向流动来给大豆根系供水, 会改变大豆的根系分布, 使得大豆根系更长更分散, 则不利于根瘤的生长。叶面积指数随着植株生长逐渐增大, 后随着植株衰老导致的叶片脱落、叶片数减少而降低, 在花荚期达到最大值 (图 4 (c))。无膜畦灌处理的土壤温度最低, 植物生长迟缓, 叶面积指数达到最大值的时间最晚。覆膜条件下单片叶面积和叶片数均高于无膜, 因而覆膜条件下的  $LAI$  对比无膜提高了 18.29%。畦灌对比滴灌  $LAI$  高 5.45% 主要表现在单片叶面积的增大。滴灌与畦灌  $Cc$  的差异主要体现在生育前期和生育后期 (图 4 (d)), 在播种后, 因为滴灌的土壤温度高于畦灌且土壤未板结, 有利于植株生长, 因此在大豆生育前期滴灌的冠层覆盖度更大, 同时因为滴灌缩短了大豆的生育期, 使得大豆的叶片相比于畦灌率先脱落, 所以生育后期滴灌的冠层覆盖度更小, 这与叶面积指数是一致的。

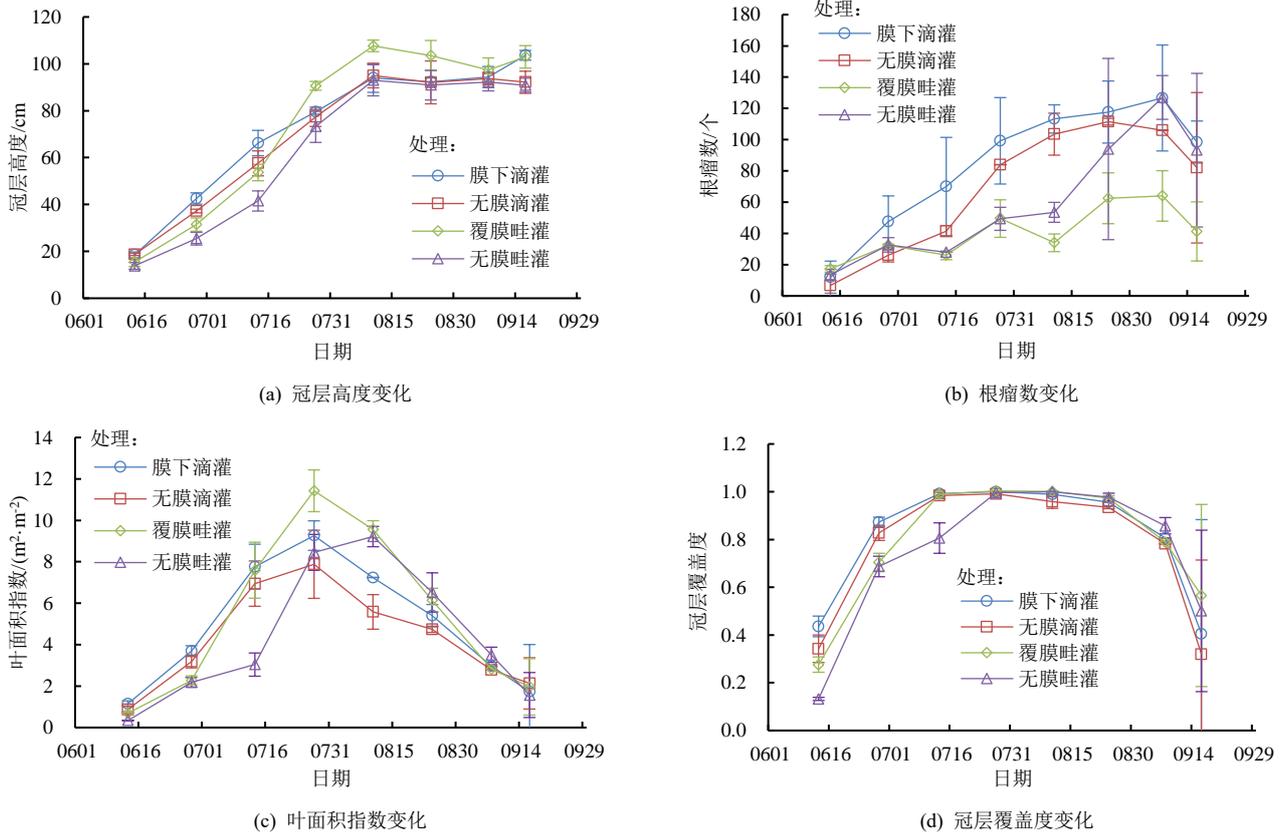


图 4 不同灌溉方式下大豆生长指标随时间的变化

Fig.4 Changes of soybean growth indexes with time under different irrigation methods

表 6 不同灌溉方式下大豆生长指标平均值

Table 6 Average values of each growth index for soybean under different irrigation methods

处理	冠高/cm	根瘤数/个	平均单片叶面积/cm <sup>2</sup>	叶片数/个	LAI(m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )	Cc	
膜下滴灌	73.89±21.15a	86±40a	64.16±21.67a	77±27a	4.90±2.98a	0.81±0.25a	
无膜滴灌	70.48±29.47a	70±40ab	56.25±21.74a	78±29a	4.27±2.44a	0.77±0.28a	
覆膜畦灌	75.33±36.47a	41±17b	68.57±21.21a	81±44a	5.31±3.95a	0.79±0.26a	
无膜畦灌	65.14±33.11a	61±39ab	61.66±23.06a	73±37a	4.36±3.30a	0.74±0.30a	
覆膜处理	74.61±32.15a	63±37a	66.37±20.84a	79±35a	5.11±3.39a	0.80±0.25a	
无膜处理	67.81±30.40a	66±39a	58.96±20.84a	75±32a	4.32±2.80a	0.76±0.28a	
平均值	滴灌处理	72.19±28.65a	78±39a	60.21±21.83a	77±27a	4.59±2.65a	0.79±0.26a
	畦灌处理	70.24±34.06a	51±31a	65.12±21.36a	77±39a	4.84±3.55a	0.77±0.27a
	4 种处理	71.21±30.97	65±37	62.66±21.70	77±33	4.71±3.08	0.78±0.26

注 上下两部分同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

### 2.3 大豆耗水规律及影响因素

图 5 是 4 种灌溉方式下大豆全生育期内耗水量的日变化,可以看出在整个生育期内 *ET* 先增大后减小,呈“倒 V 型”变化,不同灌溉方式下大豆各个生育时期的耗水量如表 7 所示,膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌在花荚期和鼓粒期的总耗水量分别为 237.78、268.92、330.62、370.57 mm,占总耗水的比例分别为 62.75%、64.12%、65.15%、64.86%,这 2 个时期是大豆耗水量主要集中的时期,也是不同灌溉方式下耗水差异表现最明显的时期。全生育期内膜下

滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌的总耗水量分别为 378.92、419.38、507.48、571.38 mm,平均日耗水量分别为 2.81、3.04、3.68、4.02 mm/d。从耗水总量上来看,覆膜比无膜的总耗水量减少 52.18 mm,滴灌比畦灌的总耗水量显著减少 140.28 mm,而且膜下滴灌的节水效果表现出了覆膜和滴灌节水能力的叠加,总耗水量均低于其他 3 种处理。从耗水强度上来看,覆膜比无膜的耗水强度降低了 0.29 mm/d,滴灌比畦灌的耗水强度降低了 0.93 mm/d,膜下滴灌的耗水强度最低。

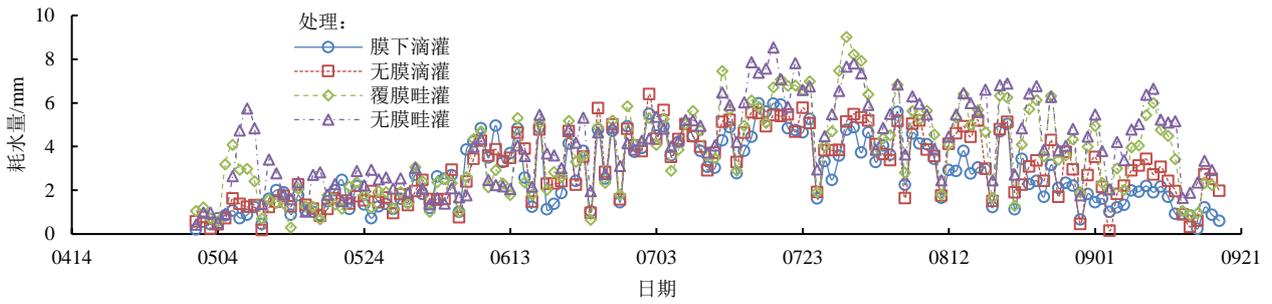


图 5 不同灌溉方式耗水量的日变化

Fig.5 Diurnal variation of water consumption in different irrigation methods

表 7 不同灌溉方式下不同生育期的耗水量

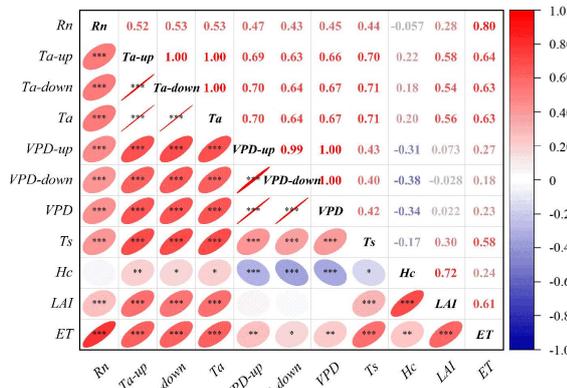
Table 7 Water consumption of different growth periods in different methods

处理	时间/d	耗水量/mm						耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	
		苗期	分枝期	花荚期	鼓粒期	成熟期	全生育期		
膜下滴灌	135	39.22b	81.57a	148.41b	89.37b	20.35b	378.92c	2.81	
无膜滴灌	138	39.88b	82.21a	163.40b	105.52b	28.37b	419.38c	3.04	
覆膜畦灌	138	52.95b	79.56a	192.25a	138.37a	44.35a	507.48b	3.68	
无膜畦灌	142	71.62a	83.44a	222.30a	148.27a	45.75a	571.38a	4.02	
覆膜处理	137	46.09bc	80.57a	170.33bc	113.87bc	32.35bc	443.20bc	3.25	
无膜处理	140	55.75ab	82.83a	192.85ab	126.89ab	37.06ab	495.38ab	3.54	
平均值	滴灌处理	137	39.55c	81.89a	155.91c	97.45c	24.36c	399.15c	2.92
畦灌处理	140	62.29a	81.50a	207.28a	143.32a	45.05a	539.43a	3.85	
4 种处理	138±3	50.92±15.18	81.70±1.62	181.59±32.67	120.38±27.59	34.70±12.40	469.29±86.68	3.39±0.56	

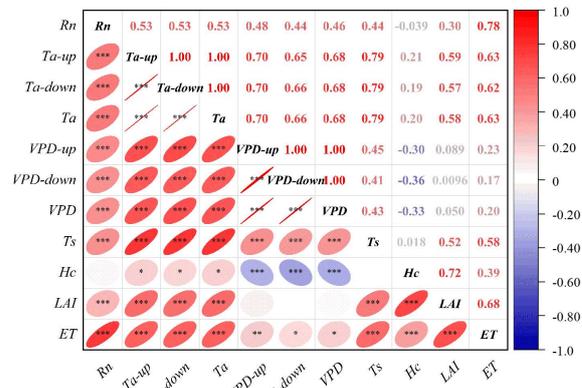
注 上下 2 部分同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

将不同灌溉方式下的净辐射 ( $R_n$ )、上层空气温度 ( $T_{a-up}$ )、下层空气温度 ( $T_{a-down}$ )、平均空气温度 ( $T_a$ )、土壤温度 ( $T_s$ )、土壤含水率 ( $SWC$ )、上层饱和水汽压差 ( $VPD-up$ )、下层饱和水汽压差 ( $VPD-down$ )、平均饱和水汽压差 ( $VPD$ )、冠层高度 ( $H_c$ )、叶面积指数 ( $LAI$ ) 与耗水量 ( $ET$ ) 进行相关性分析, 结果如图 6 所示。不同的环境因子之间以及环境因子与生长指标之间存在相关性。研究表明 4 种处理下,  $ET$  的影响因子中  $R_n$ 、 $T_{a-up}$ 、 $T_{a-down}$ 、 $T_a$ 、 $T_s$ 、 $VPD-up$ 、 $H_c$ 、 $LAI$  均与  $ET$  具有显著的正相关关系, 且其中相关性最强的分别为  $R_n$  和  $LAI$ , 这与前人的研究结果一致<sup>[20-22]</sup>。 $R_n$  的增大有利于大豆

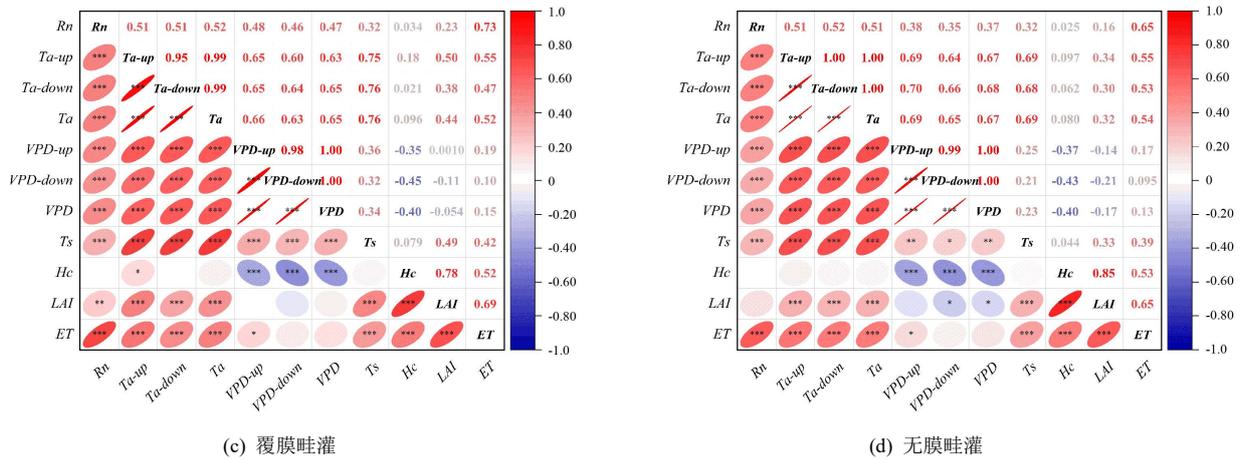
的生长发育, 同时促进了大豆  $LAI$  的增大。大豆的  $LAI$  增大意味着单位面积上可以参与蒸腾的叶片总面积增大, 促进了大豆的蒸腾作用, 尽管  $LAI$  越大对土壤的遮阴作用可能更大, 土壤蒸发量可能有所降低, 但是蒸腾在耗水中的占比更大, 因而大豆的  $ET$  也会随之增大。不同的灌溉方式下各因子之间的相关性表现并不相同。 $VPD-down$  和  $VPD$  仅在滴灌条件下与  $ET$  具有显著的正相关关系, 而在畦灌中的正相关关系并不显著。有研究发现土壤蒸发和植株蒸腾对  $VPD$  变化的响应可能不同步<sup>[23]</sup>, 而畦灌和滴灌由于灌水的差异导致土壤蒸发和植株蒸腾存在差异, 这种差异可能是滴灌与畦灌中  $ET$  与  $VPD$  显著性不同的原因。



(a) 膜下滴灌



(b) 无膜滴灌



注 \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

图 6 不同灌溉方式下环境因子与生物因子和耗水量的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of environmental factors, biological factors and water consumption under different irrigation methods

### 2.4 不同灌溉方式下的产量、收获指数及水分利用参数

表 8 列出了不同灌溉方式的大豆产量 ( $Y$ )、地上干物质量、耗水量 ( $ET$ )、收获指数 ( $HI$ )、水分利用效率 ( $WUE$ ) 和灌溉水利用效率 ( $IWUE$ )。覆膜比无膜处理的产量显著提高  $306.89 \text{ kg/hm}^2$ ，滴灌与畦灌处理的产量几乎无差异；4 个处理中，无膜滴灌的产量表现为最低。膜下滴灌比无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌各增产  $18.07\%$ 、 $5.27\%$ 、 $11.17\%$ ，这表明覆膜和滴灌的结合会增加大豆的增产效果。覆膜处理的平均地上生物量高于无膜处理，滴灌处理也高于畦灌处理，

膜下滴灌的地上生物量最高。覆膜处理的收获指数高于无膜处理  $12.24\%$ ，滴灌处理低于畦灌处理  $7.41\%$ ，但均无显著差异，可能的原因是不同处理下的干物质在地上部分的分配并没有明显的改变，经济产量和地上生物量之间的比例比较稳定；覆膜对比无膜的平均水分利用效率显著提高  $25.93\%$ ，滴灌对比畦灌  $WUE$  平均显著提高  $34.62\%$ ，膜下滴灌比无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌  $WUE$  均显著提高  $31.15\%$ 、 $42.86\%$ 、 $70.21\%$ 。 $IWUE$  从大到小依次为膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌，其中覆膜和滴灌均可提高  $IWUE$ ，且滴灌的灌溉水利用效率提高效果更显著。

表 8 不同灌溉方式的产量、收获指数及水分利用参数

Table 8 Yield, harvest index and water use parameters under different irrigation methods

处理	$Y(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	地上生物量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	灌水量/mm	$ET/\text{mm}$	$HI$	$WUE/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$IWUE/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
膜下滴灌	$3\ 016.84 \pm 260.92a$	$5\ 788.43 \pm 500.62a$	176.09	378.92c	$0.52 \pm 0.05a$	$0.80 \pm 0.07a$	$1.71 \pm 0.15a$
无膜滴灌	$2\ 555.13 \pm 243.80b$	$5\ 383.33 \pm 513.66a$	176.09	419.38c	$0.47 \pm 0.05a$	$0.61 \pm 0.06b$	$1.45 \pm 0.14b$
覆膜畦灌	$2\ 865.74 \pm 252.73a$	$4\ 991.76 \pm 440.22a$	271.74	507.48b	$0.57 \pm 0.05a$	$0.56 \pm 0.05b$	$1.05 \pm 0.09c$
无膜畦灌	$2\ 713.66 \pm 328.63ab$	$5\ 337.64 \pm 646.40a$	271.74	571.38a	$0.51 \pm 0.06a$	$0.47 \pm 0.06c$	$1.00 \pm 0.12c$
覆膜处理	$2\ 941.29 \pm 256.83a$	$5\ 390.10 \pm 470.42a$	443.20	443.20bc	$0.55 \pm 0.05a$	$0.68 \pm 0.06a$	$1.38 \pm 0.12a$
无膜处理	$2\ 634.40 \pm 286.22b$	$5\ 360.49 \pm 580.03a$	495.38	495.38ab	$0.49 \pm 0.05a$	$0.54 \pm 0.06b$	$1.22 \pm 0.13b$
平均值	$2\ 785.99 \pm 252.36ab$	$5\ 585.88 \pm 507.14a$	399.15	399.15c	$0.50 \pm 0.05a$	$0.70 \pm 0.06a$	$1.58 \pm 0.14a$
滴灌处理	$2\ 789.70 \pm 290.68ab$	$5\ 164.70 \pm 543.31a$	539.43	539.43a	$0.54 \pm 0.06a$	$0.52 \pm 0.05b$	$1.03 \pm 0.11b$
畦灌处理	$2\ 787.84 \pm 271.52$	$5\ 375.29 \pm 525.23$	469.29±55.22	469.29±86.68	$0.52 \pm 0.05$	$0.61 \pm 0.06$	$1.30 \pm 0.13$

注 上下 2 部分同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

### 3 讨论

膜下滴灌、无膜滴灌、覆膜畦灌、无膜畦灌处理下大豆生育期内的耗水量分别为  $378.92$ 、 $419.38$ 、 $507.48$ 、 $571.38 \text{ mm}$ 。整个生育期内膜下滴灌的耗水量比无膜滴灌减少了  $40.46 \text{ mm}$ ，覆膜畦灌的耗水量比无膜畦灌显著减少了  $63.90 \text{ mm}$ 。因此无论是滴灌还是畦灌，覆膜都具有一定的节水作用，这与前人<sup>[24-27]</sup>的研究结果一致。覆膜的节水作用在畦灌条件下更加明显，

原因可能在畦灌条件下，土壤含水率较高，土壤蒸发更强烈，因此覆膜在畦灌条件下减少的土壤蒸发更多，体现在  $ET$  上也就更加明显；同时，膜下滴灌的耗水量比覆膜畦灌显著减少了  $128.56 \text{ mm}$ ，无膜滴灌的耗水量比无膜畦灌显著减少了  $152.00 \text{ mm}$ ，无膜滴灌的耗水量与覆膜畦灌相比也显著减少了  $88.11 \text{ mm}$ ，通过这些数据对比说明，滴灌具有更好的节水效果，而畦灌会大大增加大豆生育期内的耗水量，即使是覆膜畦灌仍要比无膜滴灌的耗水量高，这说明畦灌的高耗

水已经掩盖了覆膜对于耗水的抑制作用，推测原因可能是畦灌的灌水方式为少次多量，土壤含水率相比滴灌较高，这会造成畦灌处理下的土壤蒸发较大，特别在畦灌灌水后土壤表面会有积水产生，这将会产生大量的无效蒸发直接增加畦灌耗水量<sup>[5]</sup>。

膜下滴灌在 4 种处理中全生育期的耗水最少除了会受到灌水方式，覆膜措施以及大豆长势的影响外，还会受到大豆生育期长短的影响。本试验得到 4 种处理的大豆成熟时间不一致，其中膜下滴灌最先成熟，无膜滴灌与覆膜畦灌次之，最后是无膜畦灌。覆膜处理比无膜处理早成熟 4 d 左右，滴灌处理对比畦灌处理也早成熟 4 d 左右，这表明覆膜与滴灌的协同增温效应对大豆的生长发育起到了促进作用，因此膜下滴灌促进了作物的生长发育进程缩短了生育期，这也在一定程度上减少了膜下滴灌处理下大豆全生育期的耗水量<sup>[28-29]</sup>。

膜下滴灌产量高于无膜滴灌、覆膜畦灌产量高于无膜畦灌，这说明了覆膜具有增产作用结果，与前人<sup>[24,29-31]</sup>的研究一致，膜下滴灌产量高于覆膜畦灌，这也说明了滴灌的增产效果<sup>[32]</sup>，然而无膜滴灌的产量却低于无膜畦灌，说明在无膜的情况下，滴灌的增产效果没有显现出来，但并不能因此否定滴灌的增产效果。相比畦灌，滴灌的灌水量很小，在无膜情况下土壤含水率低，从而影响了作物的生长。通常作物产量随灌水量的增加呈先增大后减小的趋势<sup>[33-34]</sup>，本试验中滴灌处理的灌水量较低，在灌水量增加的情况下，滴灌处理的产量或有增加的可能，显现滴灌增产的效果。

膜下滴灌产量对比其他 3 种灌溉方式产量平均增加了 11.51%，耗水量减少了 24.13%，这说明膜下滴灌对减少作物的耗水量，提高水分利用效率具有促进作用<sup>[30-32,35-36]</sup>。尽管畦灌对比滴灌在平均产量上没有显著降低，甚至略有升高，但由于畦灌条件下的耗水量远高于滴灌，导致畦灌条件下的水分利用效率显著低于滴灌条件下的水分利用效率。2 种滴灌方式下的灌水量相同、2 种畦灌方式下的灌水量相同，灌溉水利用效率的差异主要在于各处理产量及滴灌和畦灌灌水量的差异，此时膜下滴灌的产量最高，灌水量相比畦灌少，所以其灌溉水利用效率最大，而无膜滴灌产量虽低，但灌水量比畦灌少 35.20%，使得其灌溉水利用效率依然高于畦灌。

本研究中的大豆试验的灌溉时间和灌溉量是参考当地实际生产制定的 4 种灌溉方式和灌溉制度。欲通过滴灌与畦灌对比，覆膜与无膜对比，揭示不同灌溉方式对大豆生长发育、产量及水分利用的影响。试验结果表明膜下滴灌是促进大豆生长及水分利用较

好的灌溉方式。在接下来的研究中可进一步设置不同的灌溉梯度的水肥亏缺试验，探究膜下滴灌更高效的灌溉制度。

## 4 结论

与畦灌相比，滴灌使大豆生育期内的总耗水量平均显著减少 26.01%；与无膜相比，覆膜使大豆生育期内的总耗水量平均减少 10.53%；对比膜下滴灌与无膜畦灌，覆膜和滴灌 2 种节水措施使大豆生育期耗水减少了 33.68%。膜下滴灌综合了覆膜和滴灌的节水增产作用，比其他处理大豆产量平均提高了 11.51%，水分利用效率平均提高了 48.07%，灌溉水利用效率平均提高了 46.57%。综合考虑作物的耗水、产量、水分利用效率，膜下滴灌对大豆生长提供了更适宜的生长环境并具有明显的节水增产高效作用。膜下滴灌这一现代化节水措施可以在大豆生产中采用并被进一步推广。

## 参考文献：

- [1] 朱文博, 韩听儒, 问锦尚. 中国大豆生产自给的潜力、路径与挑战[J]. 华南师范大学学报(社会科学版), 2022(3): 122-135, 207.  
ZHU Wenbo, HAN Xinru, WEN Jinshang. The potential, path and challenge of Self-sufficiency in soybean production in China[J]. Journal of South China Normal University (Social Science Edition), 2022(3): 122-135, 207.
- [2] 魏艳骄, 张慧艳, 朱晶. 新发展格局下中国大豆进口依赖性风险及市场布局优化分析[J]. 中国农村经济, 2021(12): 66-86.  
WEI Yanjiao, ZHANG Huiyan, ZHU Jing. An Analysis of dependence risk and market layout optimization for soybean import of China under the new development pattern[J]. Chinese Rural Economy, 2021(12): 66-86.
- [3] 左武荣. 我国大豆进口贸易的影响及对策研究[J]. 分子植物育种, 2022, 20(2): 601-606.  
ZUO Wulong. Research on the influence and countermeasures of my country's soybean import trade[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(2): 601-606.
- [4] 杨晓娟, 刘布春, 刘园, 等. 我国大豆种植时空分布与风险费率研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 106-115.  
YANG Xiaojuan, LIU Buchun, LIU Yuan, et al. Study of spatial-temporal distribution and premium rate of soybeans in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 106-115.
- [5] YANG Danni, LI Sien, KANG Shaozhong, et al. Effect of drip irrigation on wheat evapotranspiration, soil evaporation and transpiration in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 232: 106 001.
- [6] ZHAO Yin, MAO Xiaomin, SHUKLA Manoj K. A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed-maize growth under film mulching[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 292/293: 108 127.
- [7] WANG Dan, LI Guangyong, MO Yan, et al. Evaluation of subsurface, mulched and non-mulched surface drip irrigation for maize production and economic benefits in northeast China[J]. Irrigation Science, 2021, 39(2): 159-171.
- [8] 韩翠莲, 霍轶珍, 朱冬梅. 不同灌溉方式对马铃薯光合特性和产量

- 的影响[J]. 节水灌溉, 2018(3): 27-29, 34.
- HAN Cuilian, HUO Yizhen, ZHU Dongmei. Effects of different irrigation methods on photosynthetic characteristics and yield of potato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(3): 27-29, 34.
- [9] 武淑娜, 杨树青, 李文娟, 等. 覆盖耕作对岭南旱作大豆土壤水热及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2019(8): 48-53.
- WU Shuna, YANG Shuqing, LI Wenjuan, et al. Effects of coverage cultivation on soil water heat and yield of dryland soybean in southern foot of daxing'an mountains[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(8): 48-53.
- [10] 周德录, 刘广才, 李城德, 等. 覆膜方式对不同生态区大豆产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 22-27.
- ZHOU Delu, LIU Guangcai, LI Chengde, et al. The effects of different cultivations with film mulch on yield and water use efficiency of soybean in different climatic regions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 22-27.
- [11] 王立明, 陈光荣, 杨如萍, 等. 覆膜种植方式对旱作大豆生长发育、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(21): 8-14.
- WANG Liming, CHEN Guangrong, YANG Ruping, et al. Effects of different film-mulching planting modes on growth, development, yield and water use efficiency of dryland soybean in the semiarid area of Gansu, China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(21): 8-14.
- [12] LI Sien, KANG Shaozhong, ZHANG Lu, et al. Measuring and modeling maize evapotranspiration under plastic film-mulching condition[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 503: 153-168.
- [13] 王巧娟, 何虹, 李亮, 等. 基于 AquaCrop 模型的大豆灌溉制度优化研究[J]. 中国农业科学, 2022, 55(17): 3 365-3 379.
- WANG Qiaojuan, HE Hong, LI Liang, et al. Research on soybean irrigation schedule based on AquaCrop model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3 365-3 379.
- [14] ZHANG Yunxuan, LI Sien, WU Mousong, et al. Study on the response of different soybean varieties to water management in northwest China based on a model approach[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(7): 824.
- [15] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779-787.
- [16] PEREZ P J, CASTELLVI F, IBANÑEZ M, et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 97(3): 141-150.
- [17] FALGE Eva, BALDOCCHI Dennis, OLSON Richard, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [18] ZHANG Baozhong, KANG Shaozhong, LI Fusheng, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1 629-1 640.
- [19] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 285-294.
- WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 285-294.
- [20] 李思恩. 西北旱区典型农田水热碳通量的变化规律与模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- LI Sien. Variaton and Simulation of Water, Heat and Carbon Fluxes above Typical Fields in Oasis Region of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009.
- [21] 丁日升. 干旱内陆区玉米田水热传输机理与蒸散发模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- DING Risheng. Mechanism of Water and Heat Transfer and Evapotranspiration Modeling over Maize Field in an Arid Inland Region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012.
- [22] 冯印成, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山针阔混交林水汽通量特征及其影响因子[J]. 植物生态学报, 2022, 46(8): 890-903.
- FENG Yincheng, WANG Yunqi, WANG Yujie, et al. Water vapor fluxes and their relationship with environmental factors in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(8): 890-903.
- [23] 张梦迪, 张立锋, 陈之光, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾对三江源退化高寒草甸蒸散的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7 138-7 152.
- ZHANG Mengdi, ZHANG Lifeng, CHEN Zhiguang, et al. Effects of evaporation and transpiration on evapotranspiration of degraded meadow in the three-river source region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7 138-7 152.
- [24] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 等. 基于液流计估测蒸腾分析覆膜滴灌玉米节水增产机理[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 89-97.
- ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Analysis of water saving and yield increasing mechanism in maize field with drip irrigation under film mulching based on transpiration estimated by sap flow meter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 89-97.
- [25] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- [26] 冯禹, 郝卫平, 高丽丽, 等. 地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 300-313.
- FENG Yu, HAO Weiping, GAO Lili, et al. Effects of plastic mulch on water and heat flux transfer in rainfed maize fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 300-313.
- [27] UZOKWE Pauline, 李新强, 高阳, 等. 不同灌水方式下基于水面蒸发量的夏玉米灌溉试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 59-62.
- UZOKWE Pauline, LI Xinqiang, GAO Yang, et al. Study on the suitable irrigation scheduling of summer maize based on water surface evaporation under different irrigation methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(3): 59-62.
- [28] WANG Yahui, LI Sien, QIN Shujing, et al. How can drip irrigation save water and reduce evapotranspiration compared to border irrigation in arid regions in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106 256.
- [29] SUI Juan, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 132-139.
- [30] 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 Qin'ge, 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.
- [31] ZHAO Hongxiong, LI Youcai, FENG Min, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 68-78.
- [32] 刘戈, 王凯, 刘延, 等. 不同灌溉模式对黄淮海平原夏玉米生产性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2021(4): 48-54.
- LIU Ge, WANG Kai, LIU Yan, et al. The effects of different irrigation modes on yield traits and water use efficiency of summer maize in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(4): 48-54.
- [33] 邹宇峰, 蔡焕杰, 张体彬, 等. 河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 237-248.
- ZOU Yufeng, CAI Huanjie, ZHANG Tibin, et al. Water use

- characteristics and profit analysis of spring maize production with different irrigation methods in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 237-248.
- [34] 刘学军, 翟汝伟, 李真朴, 等. 宁夏扬黄灌区玉米畦灌灌溉制度试验研究[J]. 宁夏工程技术, 2018, 317(3): 197-200, 204.  
LIU Xuejun, ZHAI Ruwei, LI Zhenpu, et al. Experimental study on irrigation system of corn flotation in Yanghuang irrigation of Ningxia[J]. Ningxia Engineering Technology, 2018, 317(3): 197-200, 204.
- [35] LIU Jianliang, ZHAN Ai, BU Lingduo, et al. Understanding dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding film-mulched maize[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 390-396.
- [36] WU Yang, HUANG Famgyuan, JIA Zhikuan, et al. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 113-121.

## Water Consumption and Water Use Efficiency of Soybean Are Impacted by Irrigation Method

GUO Zhenyu<sup>1,2</sup>, YANG Danni<sup>1,2</sup>, YANG Xiaolin<sup>1,2\*</sup>, LI Sien<sup>1,2</sup>, WANG Chunyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yunxuan<sup>1,2</sup>

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

2. National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province, Wuwei 733009, China)

**Abstract:** 【Objective】Irrigation modulates water movement in soil and its bioavailability to crop roots. This study is to investigate the effect of different irrigation methods on water consumption and water use efficiency of soybean during its whole growth period, with an aim to help develop water-saving irrigation. 【Method】The field experiment was conducted in 2021 in Wuwei, Gansu province. It compared four irrigation methods: drip irrigation under film mulching, drip irrigation without mulching, border irrigation with film mulching, and border irrigation without mulching. The Bowen ratio-energy balance system was used to continuously monitor the changes in microclimate, crop growth and yield, water consumption (*ET*) and water use efficiency (*WUE*).【Result】①Film mulching increased net radiation (*Rn*) of the soybean by 6.58 W/m<sup>2</sup>, compared to no mulching; Soil temperature increased by 1.30 °C relative to drip irrigation. ②irrigation method and mulching affected physiological indexes of the soybean both at significant levels. Film mulching increased the leaf area index (*LAI*) significantly by 18.29%, compared to no mulching, while the border irrigation increased the *LAI* by 5.45%, compared to drip irrigation. ③Film mulching and drip irrigation reduced the *ET* significantly over the whole growth period, with the mulched drip irrigation having the least *ET* - 378.92 mm, compared to other treatments. ④Among all environmental and biological factors, *Rn* and *LAI* are correlated with *ET* positively and most significantly. ⑤The yield of soybean under mulched drip irrigation was 18.07%, 5.27% and 11.17% higher than that of non-mulched drip irrigation, film mulched border irrigation, and non-mulched border irrigation, respectively. Film mulching increased *WUE* by 25.93% compared to no mulching, and drip irrigation increased *WUE* by 34.62% compared to border irrigation. The mulched drip irrigation increased *WUE* by 31.15%, 42.86% and 70.21%, respectively, compared to non-film mulched drip irrigation, film-mulched border irrigation and non-film mulched border irrigation. 【Conclusion】Compared to drip irrigation without film, border irrigation with film and border irrigation without film, the yield of drip irrigation under film increased by an average of 11.51%, *ET* decreased by 24.13%, and *WUE* increased by 48.07% and irrigation water use efficiency improved by 46.57%; Taking into account the water consumption, yield and water use efficiency of soybean, drip irrigation under film provided a more benefit growth environment for soybean growth and significantly reduced *ET* and increased yield.

**Key words:** drip irrigation; film; yield; water use efficiency; soybean

责任编辑：赵宇龙