

滴灌下秸秆覆盖与灌水量对华北冬小麦土壤水分的影响

史佳良, 王秀茹, 崔伟杰, 胡蜀东
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 试验于 2014—2015 年在北京市大兴区进行, 以冬小麦为研究对象, 以秸秆覆盖和灌水量为处理, 对小区棵间蒸发量(E)、土壤各层含水率(θ)、土壤表层温度(T_c)、叶面积指数及产量等指标进行实测与分析。结果表明: 滴灌条件下湿润带 E 普遍高于干燥带, 全观测期平均高出 16.45 mm, 较强降雨后干燥带 E 的波动更剧烈; 秸秆覆盖可以有效减少各生育期 E , 低、中、高灌水量处理下秸秆覆盖比未覆盖处理分别减少 20.45%、24.77%、19.14%, 但在较强降雨后秸秆覆盖处理 E 波动更剧烈, 不同灌水量对 E 影响不显著; 低灌水量时, 秸秆覆盖对灌溉水有明显的截留作用, 中、高灌水量时则起到明显的保墒作用; 整个观测期, E/ET 先变小再变大, 灌水量差异对 E/ET 影响显著, 低、中、高灌水量下均值分别为 29.71%、25.64%、21.38%; 秸秆覆盖和未覆盖相比三种灌水处理 E/ET 分别减少 8.93%、3.01%、0.44%。水分利用效率秸秆覆盖处理要普遍高于未覆盖处理, 并与灌溉定额之间呈负相关。整体来看, 中灌水量秸秆覆盖处理的产量和水分利用效率均较优, 适合当地冬小麦滴灌种植。

关键词: 冬小麦; 滴灌; 秸秆覆盖; 土壤蒸发; 土壤水分; 水分利用效率
中图分类号: S275.6; S152.7 **文献标志码:** A

Effects of straw mulching and irrigation amount on soil moisture of winter wheat under drip irrigation in North China Plain

SHI Jia-liang, WANG Xiu-ru, CUI Wei-jie, HU Shu-dong
(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study explored the effects of straw mulching and irrigation amount on soil moisture of winter wheat in the North China Plain in 2014 and 2015. Evaporation (E), soil moisture content of different soil layers (θ), soil surface temperature (T_c), leaf area index and yield were investigated under six treatments, including low irrigation with straw mulching (D1), low irrigation without straw mulching (D2), medium irrigation with straw mulching (D3), medium irrigation without straw mulching (D4), high irrigation with straw mulching (D5), and high irrigation without straw mulching (D6). The result showed that E of wet zone was generally larger by an average of 16.45mm than that of dry zone, the changes of the dry zone E exhibited more greatly after heavy raining. The average E of each growth period was reduced by straw mulching treatments when compared to non-mulching treatments, with the reduction of 20.45%, 24.77% and 19.14% under low, middle and high irrigation amounts, respectively, while the changes of E under mulching treatments presented more vigorous intense after heavy raining. The irrigation amounts had no significant effects on E . Straw mulching exhibited a significant interception effect on the irrigation water under low irrigation amount, and preserved soil moisture as irrigation amount rose. Throughout the observation period, E/ET decreased first and increased later, and was significantly affected by irrigation amount, with the average E/ET values being 29.71%, 25.64% and 21.38% for D1, D3 and D5, respectively. Compared to non-mulching treatments, the average E/ET of straw mulching treatments were decreased by 8.93%, 3.01% and 0.44% under D1, D2 and D3, respectively. Water use efficiency

收稿日期: 2016-05-20
基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401001)
作者简介: 史佳良(1990—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和节水灌溉。E-mail: sjl20101208@foxmail.com。
通信作者: 王秀茹(1957—), 女, 河北保定人, 教授, 博士生导师, 主要从事农田水利、水土保持等研究。E-mail: wang-xr@163.com。

was generally higher under straw mulching treatments relative to non-mulching treatments, and a negative correlation was observed between *WUE* and irrigation amounts. In summary, the D3 treatment (middle irrigation, straw mulching) was most suitable for drip irrigation of winter wheat in local area due to the better performance of yield and *WUE*.

Keywords: winter wheat; drip irrigation; straw mulching; soil evaporation; soil moisture; water use efficiency

田间蒸散量(*ET*)的变化特征及其构成比例是农田水分利用的重要影响因素,降低其中无效的棵间土壤蒸发量(*E*)是提高农业水分利用效率(*WUE*)的重要途径^[1-3]。滴灌被公认是高效节水的灌溉方式^[4],已有研究表明,滴灌较传统沟灌可有效提高水分利用效率^[5],能够在时间与空间上精确满足作物的需求要求^[6],能够提高田间蒸发蒸腾量(*ET*)中用于作物蒸腾的水分比例^[7],而且控制灌溉量不超过田间持水量能够最大限度减少深层渗透造成的水分流失^[8]。秸秆覆盖以其保墒作用和对农田生态的改善效果被广泛推广,在传统灌溉方法中能够起到降低棵间蒸发量、提高土壤含水率的作用^[9],能够增加土壤团聚体和有机质含量^[10],但也有许多研究表明秸秆覆盖会降低土壤表层温度,使生育期延缓甚至影响作物生长,出现减产现象^[11]。目前,秸秆覆盖是华北冬小麦种植广泛采取的措施,而在华北地区滴灌种植冬小麦的研究还较少^[12],滴灌的推广仍需要深入研究其土壤水分运移机理,以及二者结合对冬小麦田间水分及其利用的影响。本试验在滴灌条件下,设计秸秆覆盖和不同的灌水制度,对冬小麦各个生育期内土壤水分平衡的动态变化进行研究,解释了各时期棵间蒸发、田间蒸散、土壤含水率、土壤表层温度和叶面积指数、产量及其构成要素之间的关系,分析了秸秆覆盖和滴灌灌水量差异在不同的生长期内对各因子的影响,尤其是揭示了低灌水量下秸秆覆盖的截留作用,为华北地区冬小麦滴灌提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在北京市大兴区(39°39'N,116°15'E,海拔40.1 m)进行,试验区内土壤质地为壤土,多年试验测量区内耕作层田间持水量为30.60%,土壤容重为1.60 g·cm⁻³,多年平均降水量为540 mm,年均气温11.6℃。以冬小麦为研究对象,田间试验在其生育期(2015年4—6月)开展,供试作物品种为中麦175,2014年10月16日播种,2015年6月9日收获,播种量300 kg·hm⁻²,播种行距30 cm,田间滴灌带布设间距为60 cm。试验区已连续四年免耕种植,除

设置试验器材和取土外不对土层进行任何翻动。试验观测期内降雨与气温情况如图1所示,总降雨量为88.14 mm。

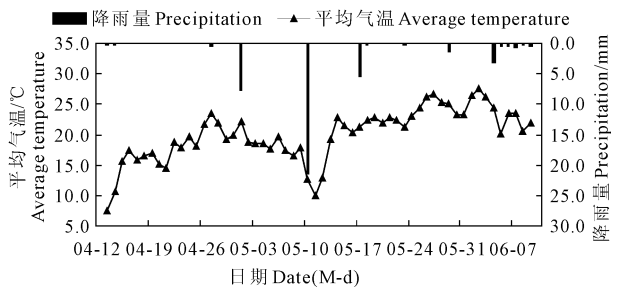


图1 冬小麦生育期内降雨与气温情况
Fig.1 Precipitation and temperature distribution during growth period of winter wheat

1.2 试验设计

试验设计了2种覆盖处理和3种灌水处理,共6个组合(处理D₁~D₆),每种处理设4次重复,共24个小区,随机区组,每个小区面积30.24 m²,长宽分别为6.3 m、4.8 m。覆盖处理分为秸秆覆盖和未覆盖,覆盖量为5 500 kg·hm⁻²;灌溉均采用地表滴灌,在冬小麦返青后的生育期内根据当时土壤实际含水量设置低、中、高3种灌溉水平,分别为:1、2号处理灌水量为田间持水量的55%~75%,3、4号处理灌水量为田间持水量的65%~85%,5、6号处理灌水量为田间持水量的75%~95%。每个处理在4月28日灌水时,采用文丘里施肥器施氮肥(100 kg·hm⁻²)。各处理覆盖与灌水情况见表1。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 棵间蒸发量(*E*) 采用微型蒸渗仪(Micro-lysimeter,MLS)和电子天平(精度0.1 g)测定,经检验该仪器测定*E*误差低于5%^[13]。MLS由内外两个高度相同的PVC材质小桶组成,桶高15 cm,内桶外径11 cm,壁厚0.36 cm,外桶内径12 cm,壁厚0.3 cm。内桶首先打入土壤中取土,修平底部后用通透性好的尼龙网布和宽胶带包裹,再将外桶固定于取土处,内外桶顶端与地面齐平。每个小区布设两个MLS,分别在滴灌带正下方(湿润带)和非滴灌带(干燥带)上,湿润带与干燥带宽度比为3:2。每隔5—7天换土,在灌水或降雨(>5 mm)后增加换土,测量

时间为每日 17:00,取每日 MLS 重量变化值除以内桶表面积得到 $E(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 。冬小麦滴灌试验的棵间蒸发(E)分为湿润带棵间蒸发(E_w)和干燥带棵间蒸发(E_d),按实际面积比例分别为 60%、40%。

表 1 各处理的实际灌水时间和灌水量
Table 1 Irrigation date and quantity of all the treatments

处理编号 Treatments No.	处理 Treatments	灌水量 Irrigation amount/mm						总灌水量 Total amount /mm
		04-08	04-28	05-07	05-22	05-25	05-28	
D1	低水覆盖 Low irrigation and covered	26.11	10.28	23.35		31.70		91.44
D2	低水不覆盖 Low irrigation and not covered	26.11	27.75	27.81		35.15		116.82
D3	中水覆盖 Medium irrigation and covered	26.11	35.93	29.31		30.28		121.63
D4	中水不覆盖 Medium irrigation and not covered	26.11	51.80	38.69		32.79		149.39
D5	高水覆盖 High irrigation and covered	26.11	39.96	47.90	36.58		31.71	182.26
D6	高水不覆盖 High irrigation and not covered	26.11	60.59	56.63	40.36		38.84	222.53

1.3.2 土壤含水率(θ)和土壤地表温度(T) 利用 Decagon 公司的 EC-5、EC-TM 传感器采集,分别置于各试验小区土壤表层下 0~20 cm(EC-TM)和 20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm(EC-5)处,每日 17:00 测定。在灌水或降雨(>5 mm)后的 1、3、5 天在每个小区传感器附近取土,烘干称量并换算出体积含水率,对传感器数据进行标定。同时 EC-TM 传感器也可采集地下 10 cm 处土壤温度。

1.3.3 叶面积指数(LAI) 各生育期内,每个小区随机选取连续 20 cm×25 cm 的小麦进行考种,测定株高并称量叶片总重;随机选取其中 10 片叶,采用叶面积扫描仪测量叶面积,并称量该 10 片叶片的重量,并由此计算出总叶面积与地表面积的比值(LAI)。

1.3.4 田间蒸发蒸腾量(ET) 冬小麦 ET 通过水量平衡原理计算得到^[14],公式为:

$$ET = P + I + U - R - F - \Delta W$$

式中, P 为降水量,由试验站内气象站测得; I 是灌水量,通过灌水定额换算得到; ΔW 是土壤含水量变化值,通过实测逐日土壤含水率计算得出; U 是地下水补给量; R 为地表径流量; F 为深层渗漏量。该试验中 R 、 F 、 U 三项可忽略不计,因此将公式简化为:

$$ET = P + I - \Delta W$$

1.3.5 水分利用效率(WUE) 在冬小麦成熟以后,对产量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、千粒重(g)与穗数进行考种测量。WUE 分为土壤水分利用效率(WUE_s)和灌溉水分利用效率(WUE_I)两种^[15],公式分别为:

$$WUE_s = \frac{Y}{\sum ET}$$
$$WUE_I = \frac{Y}{Q_I}$$

式中, Y 为冬小麦籽粒产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),收获后脱粒晒干,折算为每平方米产量; $\sum ET$ 是整个生育期田间蒸发蒸腾量的总和(mm),通过逐日量换算得到; Q_I 为冬小麦全生育期灌水总量(mm)。

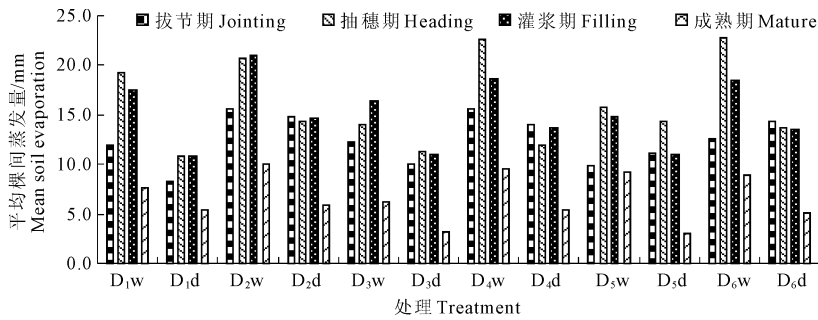
1.4 数据处理

数据处理与分析采用软件 Excel 2013 和 SPSS 20.0,采用 Duncan 法对试验数据进行多重比较和方差分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌量和秸秆覆盖对棵间蒸发的影响

2.1.1 不同生育期棵间蒸发变化分析 各处理下全观测期内棵间蒸发量(E)在 43.61~60.25 mm 之间波动,低、中、高灌水量处理下秸秆覆盖比未覆盖分别减少 12.32、14.36、10.79 mm,减少比例依次为 20.45%、24.77%、19.14%,表明秸秆覆盖可显著减少 E ;而低、中、高灌水量处理下全观测期平均 E 为 54.09、50.79、50.97 mm,可知灌水量的差异对该地区冬小麦棵间蒸发的影响并不显著;各处理在全观测期内的湿润带 E 明显高于干燥带,如图 2 所示,D1~D6 处理分别多出 20.71、17.67、13.70、21.30、10.33、16.19 mm,与周杨等^[16]的研究结果一致。



注:图中 w 与 d 分别表示各处理滴灌湿润带和干燥带,下同。 Note: the “w” and “d” represent wet zone and dry zone, the same below.

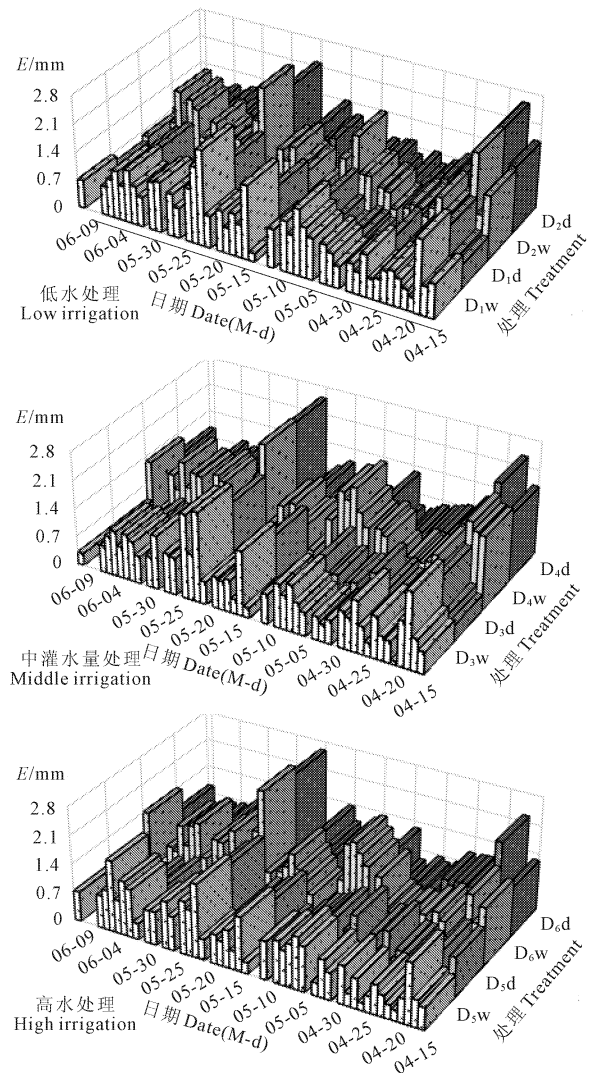
图 2 不同生育期田间蒸发量的变化

Fig.2 Soil evaporation during growth period of winter wheat

从整个观测期来看, $D_1 \sim D_6$ 处理日均 E 值分别为 0.83、1.07、0.78、1.02、0.80、1.00 mm, 日均田间蒸发量在灌浆期达到顶峰 (1.12 mm), 这与张娜等^[17]的研究结果相似, 但本试验中各处理日均 E 与气温升高的趋势并不同步。气温上升最迅速的抽穗期的日均 E 较拔节期仅上升了 0.04 mm, 而气温升幅较小的灌浆期的日均 E 较抽穗期上升了 0.28 mm, 成熟期的日均 E 较灌浆期则下降了 0.17 mm。说明随着冬小麦拔节生长, 叶面积迅速增加, 耗水逐渐由土壤蒸发为主转变为叶面蒸腾为主, 故日均 E 增长较少, 而进入了抽穗期后气温持续上升, 叶面积指数开始下降, 在冬小麦蒸腾能力趋于饱和的情况下, 日均 E 再次上升。

2.1.2 降雨与灌水后逐日 E 变化分析 由图 3 可以看出, 除拔节期的 D_5 、 D_6 处理之外, 湿润带 E 均大于干燥带 E , 这可能是因为高灌水量处理下, 湿润带内土壤水分过多, 土壤升温较慢, 使拔节期内 D_5 、 D_6 湿润带 E 小于干燥带 E 的情况出现。各小区降雨或灌水后, E 均有大幅提升, 其中 5 月 17—18 日较强降水后, 19 日各处理干燥带 E 上升在 2.87 倍(D_6)到 6.23 倍(D_1)之间, 均值为 4.03 倍, 而各处理湿润带 E 上升在 1.99 倍(D_1)到 3.45 倍(D_4)之间, 均值为 2.73 倍, 说明湿润带 E 更加稳定; 而覆盖处理 E 平均上升 3.50 倍, 未覆盖处理 E 平均上升 2.99 倍, 说明在较大降水情况下覆盖处理 E 反而变化更剧烈, 这一现象在其他较大降雨后的 4 月 16 日(覆盖上升 1.34 倍, 未覆盖上升 0.92 倍)和 5 月 10 日(覆盖上升 8.98 倍, 未覆盖上升 3.19 倍)的降雨时也均有体现, 原因可能是秸秆本身孔隙度较大, 随天气放晴蒸发更快从而拉动土壤蒸发。本试验中, 灌水后各小区 E 没有出现明显升高, 覆盖处理与不同灌水量处理的 E 在灌水后未出现显著差

异。



注:图中断点处为当天降雨或灌水。 Note: the breakpoints of the figure are the days of rainfall or irrigation.

图 3 田间蒸发量的动态变化

Fig.3 Dynamic variation of soil evaporation

2.2 滴灌量和秸秆覆盖对土壤水分的影响

如表 2 所示,在整个观测期内 D₁ ~ D₆ 处理的平均土壤体积含水率(θ)分别为 19.36%、20.18%、23.08%、21.97%、26.82%、22.15%,各处理 θ 变化趋势一致,覆盖处理 θ 波动较为缓和,除低灌水量处理(D₁、D₂)外 θ 均高于未覆盖处理,相同处理下各土层 θ 随灌水量的增加而增加。

各处理 0 ~ 20 cm 土层 θ 在降雨或灌水后均显著增大。低灌水量处理下,覆盖 θ 为 17.89% (D₁),低于未覆盖的 20.31% (D₂),在中灌水量处理下,覆

盖 θ 则略高于未覆盖 θ ,高灌水量处理下覆盖 θ 则显著高于未覆盖 θ ,如表 2 所示。结合本文之前低灌水量下秸秆覆盖对 E 影响的情况,判断出现该现象的原因可能是秸秆对灌溉水的截留,使得低灌水量覆盖处理中相当一部分的水分未能进入土壤,因而出现了 E 较低的情况下秸秆覆盖处理较未覆盖处理 θ 更低的现象;而中灌水量时,随着灌水量提升,秸秆截留作用有限,进入土壤的水分较多,秸秆覆盖的保墒能力逐渐显现;高灌水量时,秸秆覆盖有着显著的保墒作用。

表 2 各处理不同土层深度全观测期平均土壤含水率/%
Table 2 Average soil moisture content in the whole growth period of different soil layers

处理 Treatments	土层深度 Soil depth/cm				
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	平均值 Average
D ₁	17.89d	19.92c	20.62cd	19.06c	19.37c
D ₂	20.31c	22.08bc	20.22d	18.19c	20.18c
D ₃	22.75b	23.26b	23.77b	22.60b	23.08b
D ₄	21.69bc	22.32b	21.97c	21.93b	21.98b
D ₅	26.72a	27.57a	26.03a	26.92a	26.81a
D ₆	21.11bc	22.59b	21.79c	22.95b	22.11b

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。
Note: different lowercase letters in the same column mean significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

由图 4 可知,20 ~ 40 cm 土层 θ 变化与 0 ~ 20 cm 土层一致,低灌水量处理下覆盖 θ 仍低于未覆盖 θ ,中灌水量处理覆盖 θ 与未覆盖 θ 差异已很微弱,表明 E 对于该土层内的土壤水分影响不显著,高灌水量处理组内秸秆覆盖的土壤含水率高于未进行秸秆覆盖处理的土壤含水率, θ 变化曲线略平缓。各处理下 40 ~ 60 cm 土层 θ 变化更加平缓,除去降雨和灌水以外波动均在 10% 以内 ($P < 0.05$),覆盖处理 θ 均高于未覆盖 θ 。各处理 60 ~ 80 cm 土层 θ 变化几乎不受降雨和灌水影响,覆盖处理平均 θ 均高于未覆盖 θ 。低灌水量条件下,覆盖处理 θ 逐渐降低,至成熟期时 0 ~ 80 cm 各土层 θ 均低于未覆盖处理 θ ,均值分别为 13.45% 和 15.64%。以上结果表明,在该地区滴灌种植冬小麦灌水量过低时,秸秆覆盖对于水分的截留作用会影响灌溉水的入渗,秸秆覆盖反而会降低 θ ,只有在灌溉水量远远超过秸秆覆盖层的截留量的情况下,秸秆覆盖层才会体现出保墒作用。

2.3 滴灌量和秸秆覆盖对土壤表层温度的影响

观测期内各试验小区土壤表层温度(T_c)在 12.6℃ ~ 26.1℃ 之间变化,D₁ ~ D₆ 处理的平均土壤温度分别为 19.25℃、20.55℃、19.20℃、20.96℃、20.03℃、19.79℃。如图 5 所示,低、中灌水量处理

下,秸秆覆盖的 T_c 均显著低于未覆盖处理 ($P < 0.05$),高灌水量处理下则秸秆覆盖的 T_c 略高于未覆盖处理。按生育期来看,低灌水量处理下,未覆盖比覆盖 4 个时期日均 T_c 分别高出 2.1℃、0.8℃、1.5℃ 和 1.5℃;中灌水量处理 4 个生育阶段未覆盖比覆盖分别高出 3.2℃、1.1℃、1.9℃、1.9℃;高灌水量处理未覆盖比覆盖分别高出 0.1℃、-0.3℃、-0.4℃、0.3℃。由此可见,秸秆覆盖在一定灌水量范围内会明显降低 T_c ($P < 0.05$),而在灌水量较高时该作用不显著。由图中 5 月 10 日(降雨 21.34 mm)各处理土壤温度可看出,应对较大降雨量时,未覆盖处理的 T_c 变化幅度明显大于覆盖处理 T_c ($P < 0.05$)。D₁ ~ D₆ 的 T_c 较雨前分别降低 3.6℃、5.1℃、3.5℃、5.7℃、3.9℃、4.0℃,这与陈素英等^[17]的研究结果相似,秸秆覆盖起到平抑 T_c 变化的作用。

2.4 滴灌量和秸秆覆盖对田间蒸发蒸腾的影响

2.4.1 田间蒸发蒸腾量(ET) 如表 3 所示,各处理全观测期 ET 总量由于灌水量与覆盖处理的不同产生了较大的差异:覆盖处理下中、低灌水量处理的 ET 总量相差不大,分别为 189.8 mm 和 180.7 mm,均低于覆盖高灌水量处理的 ET 总量 215.4 mm;未进行秸秆覆盖处理组中各灌水量处理的 ET 有显著差异 ($P < 0.05$),其 ET 总量呈现出:高灌水量处理

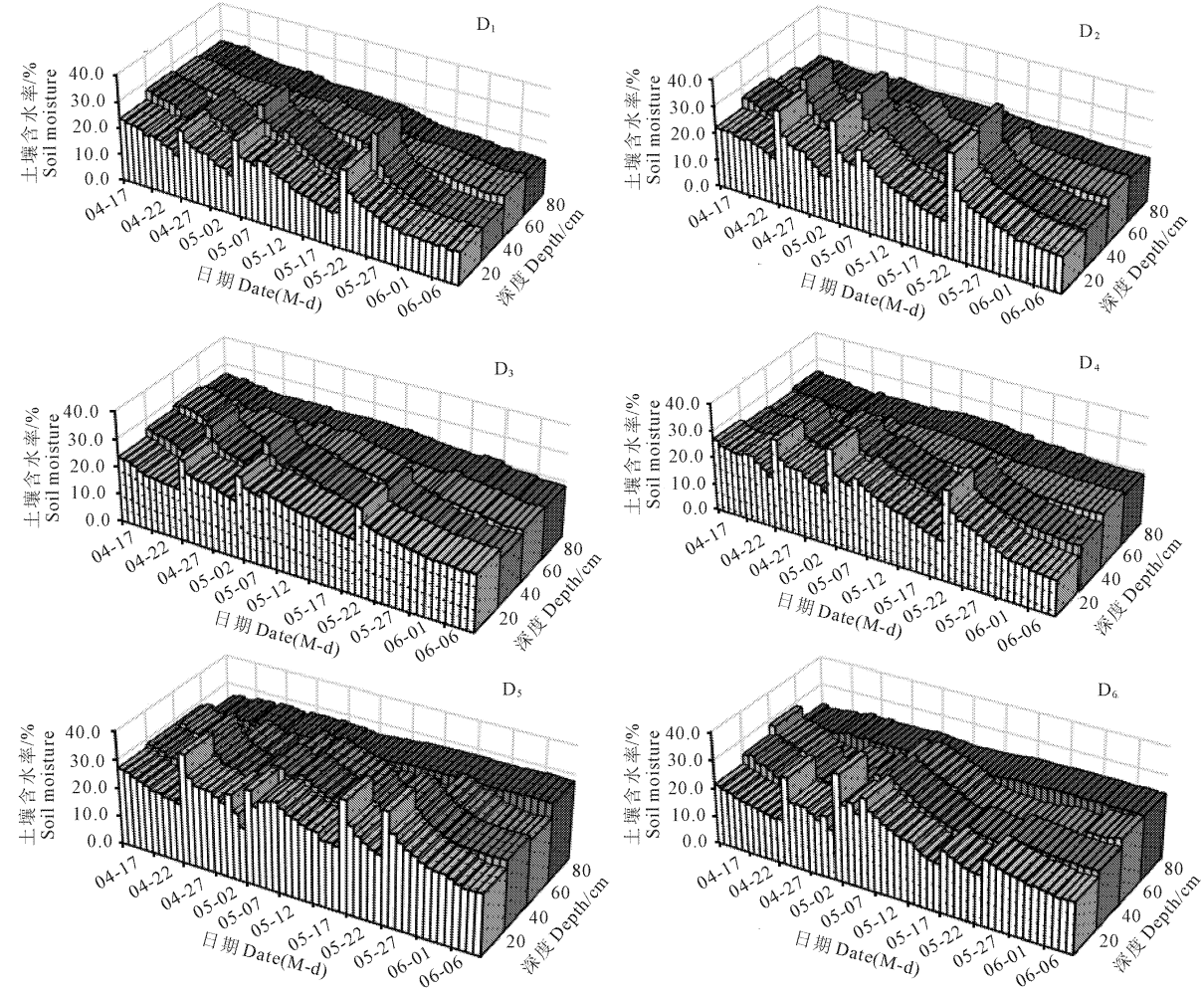


图 4 土壤含水率的动态变化

Fig.4 Dynamic variation of volume content of soil

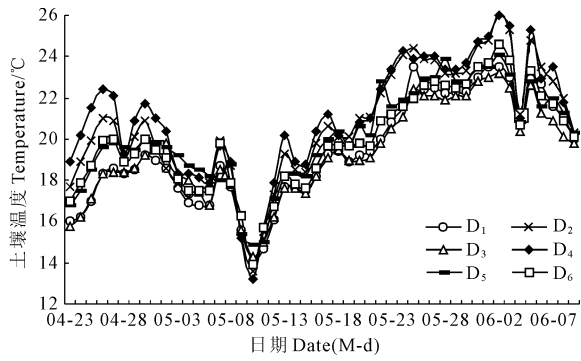


图 5 土壤表层温度的动态变化

Fig.5 Dynamic variation of soil temperature in the 10 cm depth

(260.9 mm) > 中灌水量处理(213.5 mm) > 低灌水量处理(176.3 mm),这与生产实践经验相符。从各生育期的 ET 值来看,各处理的 ET 在抽穗期达到了峰值,与李杰等^[18]的研究结果一致,这可能是由于在抽穗期内冬小麦的叶面积达到最高峰,加之气温升

高日照充足,冬小麦的蒸腾作用强烈,再加上几次强降水,土壤表面含水量过高,棵间蒸发量巨大,使得各处理抽穗期平均 ET 均高于其他生育期($P < 0.05$)。

2.4.2 E/ET 变化分析 从整个冬小麦生育期来看,低、中、高灌水量处理的 E/ET 差异显著($P < 0.05$),其均值比例分别为 29.71%, 25.64%, 21.38%,呈递减趋势。秸秆覆盖和未覆盖相比,3种灌水处理全观测期 E/ET 分别减少 8.93%, 3.01%, 0.44%。而相同灌水量处理下,秸秆覆盖造成的 E/ET 减少程度在每个时期也有不同:低灌水量处理组在拔节期内 E/ET 减少程度最大,为 26.82%;而中、高灌水量处理组则是在成熟期内 E/ET 减少最多,分别为 22.70%和 11.75%。从整个冬小麦生育期来看, E/ET 经历了由大变小再变大的变化过程,出现这一现象的原因是随着冬小麦的生长,叶面积也在不断增大,冬小麦叶片的蒸腾不断

加大;当冬小麦叶片生长达到顶峰后,随着冬小麦叶片蒸腾能力下降,气温不断升高的情况下, E/ET 就再次升高。

表 3 各处理全观测期平均蒸腾蒸发、叶面积和株高的变化
Table 3 Average ET , E/ET , LAI , plant height in different growth period

项目 Item	处理 Treatment	拔节期(前期、后期) Early or late jointing period		抽穗期 Heading period	灌浆期 Filling period	成熟期 Mature period	全观测期 Full observation period
ET/mm	D ₁	35.58 c		89.42 b	56.07 b	8.82 c	189.89 c
	D ₂	27.12 d		88.91 bc	45.03 c	15.27 ab	176.33 c
	D ₃	42.15 c		77.39 c	45.51 c	15.66 ab	180.75 c
	D ₄	58.00 b		93.85 ab	47.26 c	14.43 b	213.51 b
	D ₅	36.64 c		101.81 a	59.97 b	16.94 a	215.38 b
	D ₆	72.42 a		100.90 a	73.32 a	14.27 b	260.90 a
$E/ET/\%$	D ₁	29.48 b		17.76 a	26.43 b	76.53 a	25.25 bc
	D ₂	56.31 a		20.38 a	40.93 a	55.27 b	34.17 a
	D ₃	26.95 b		16.72 ab	31.36 ab	32.18 c	24.13 b
	D ₄	25.91 b		19.56 a	35.23 a	54.89 b	27.14 b
	D ₅	28.47 b		14.87 b	22.06 b	39.96 c	21.16 c
	D ₆	18.38 c		18.99 a	22.52 b	51.72 b	21.60 c
LAI	D ₁	2.65 b	7.70 a	10.51 a	3.14 ab	2.29 b	
	D ₂	3.44 a	5.69 b	9.06 b	2.09 b	2.23 b	
	D ₃	3.51 a	8.60 a	10.27 a	3.61 a	2.84 a	
	D ₄	3.69 a	7.30 ab	8.85 b	1.90 b	1.83 b	
	D ₅	2.26 b	7.25 ab	10.57 a	3.74 a	1.97 b	
	D ₆	3.57 a	9.01 a	8.88 b	2.93 ab	1.89 b	
株高/cm Plant height	D ₁	37.50 a	55.75 a	75.00 a	78.25 a	77.75 a	
	D ₂	41.00 a	55.00 a	69.25 b	78.00 a	75.50 a	
	D ₃	38.25 a	55.50 a	79.00 a	79.50 a	76.25 a	
	D ₄	40.00 a	55.25 a	71.75 ab	79.00 a	77.50 a	
	D ₅	38.75 a	55.50 a	77.25 ab	76.50 a	73.75 a	
	D ₆	41.50 a	58.00 a	71.25 ab	77.25 a	76.50 a	

2.4.3 叶面积指数(LAI)变化分析 从整个观测期来看,在拔节期前期灌水各处理中覆盖处理的 LAI 均小于未进行秸秆覆盖处理,到拔节期后期时,各处理 LAI 除 D_6 外均为覆盖处理大于未进行秸秆覆盖处理,与拔节期前后株高变化一致,之后在其他生育阶段则所有处理均表现为覆盖 LAI 大于未覆盖。出现这种现象的原因可能是在拔节期前期,覆盖处理土壤表层温度比未覆盖处理低,影响了冬小麦进入拔节期的时间,因此降低了冬小麦该阶段 LAI 。在拔节期后期,由于秸秆覆盖处理的保墒作用,覆盖处理的 LAI 高于未覆盖处理。

在拔节期后期,高灌水量处理组出现覆盖处理 LAI 小于未覆盖处理,该现象与史宝成^[19]的研究中高水分处理组情况类似,过多的水分使小麦前期生长过旺,后期发生早衰,不利于小麦植株平稳生长。

2.5 冬小麦产量及水分利用效率的分析

2.5.1 产量 由表 4 可知,在同一灌水量处理下,覆盖处理组的千粒重均高于非覆盖处理组,按低、中、高灌水量平均千粒重分别相差 4.99、5.24、5.02 g。在同一覆盖处理下,中灌水量处理组千粒重最高,低灌水量与高灌水量处理组之间相差并不明显。

从单位面积产量来看,中灌水量覆盖处理组(D_3)均值最高,达到了 $583.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,而低灌水量秸秆覆盖处理组(D_1)均值最低,为 $529.48\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$;在覆盖处理下,低灌水量处理明显使冬小麦产量降低,而中高灌水量处理之间并无明显差异;在未进行秸秆覆盖处理下,高灌水量处理明显提升了冬小麦的产量,而中、低灌水量组并无明显差异。随着灌水量的升高,平均单位产量也在升高,分别为 539.77、567.98、576.68 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。中灌水量处理较低灌水量

处理产量上升幅度大,而高灌水量处理较中灌水量处理产量上升幅度较小。

表 4 各处理冬小麦产量因子与水分利用效率
Table 4 Yield factors and WUE of different treatment

处理 Treatments	灌水定额 Irrigation quota /mm	产量 Grain yield /(g·m ⁻²)	千粒重 Thousand kernel weight/g	穗数/(穗·m ⁻²) Spike number per m ²	WUE _s /(kg·m ⁻³)	WUE _i /(kg·m ⁻³)
D ₁	91.44	529.48	32.98	662.25	2.79	5.79
D ₂	116.82	550.05	27.99	846.50	3.12	4.71
D ₃	121.63	583.60	35.49	657.75	3.23	4.80
D ₄	149.39	552.35	30.25	782.03	2.59	3.70
D ₅	182.26	580.37	32.83	729.25	2.69	3.18
D ₆	222.53	572.98	27.81	855.00	2.20	2.57

从单位面积内的穗数来看,覆盖处理明显抑制了麦穗的萌蘖,覆盖处理较未覆盖处理麦穗数分别减少了 184、124、126 个·m⁻²;灌水量的差异对麦穗数量的影响不显著,低、中、高灌水量处理的平均值分别为 754、720、792 个·m⁻²。

2.5.2 水分生产效率 由图 6 可知,秸秆覆盖处理小区的灌溉水分利用效率(WUE_i)均高于同灌水量未覆盖处理的小区,各小区 WUE_i 分别表现为:D₁ > D₃ > D₂ > D₄ > D₅ > D₆。而土壤水分利用效率(WUE_s)则是低灌水量时,覆盖处理 WUE_s 小于未覆盖处理,中、高灌水量时覆盖处理 WUE_s 大于未覆盖处理,各小区分别表现为:D₃ > D₂ > D₁ > D₅ > D₄ > D₆。对覆盖处理与未覆盖处理的 WUE_i、WUE_s 与灌水定额之间的关系进行拟合后发现,两种处理的 WUE_i 和灌水定额之间均呈现负相关的线性关系,R² 分别达到 0.997 和 0.965,未覆盖处理 WUE_s 与灌水定额线性关系较好,R² 为 0.909,覆盖处理组 WUE_s 则不存在这种线性关系。主要原因可能是低灌水量覆盖处理下,秸秆覆盖层的截留作用使水分没有得到较好利用,低温与水分亏缺也影响了冬小麦的成长导致产量较低,从而导致低灌水量覆盖组的平均 WUE_s 偏低。

表 5 秸秆覆盖和灌水量与各因子的相关系数
Table 5 Pearson correlation coefficients of straw mulching and irrigation quota with other factors

	T	E	θ	E/ET	LAI	SN	TKW	GY	WUE _s	WUE _i
SM	-0.738**	-0.956**	0.345	-0.473*	0.958**	-0.710**	0.855**	0.157	0.395	0.430*
IQ	0.175	0.155	0.564**	0.572**	-0.173	0.430*	-0.413*	0.607**	-0.773**	-0.975**

注: * P < 0.1, ** P < 0.05; SM: 秸秆覆盖 straw mulching; IQ: 灌溉水量 irrigation quota; T: 土壤表层温度 temperature in 10 cm; E: 棵间蒸发 soil evaporation; θ: 土壤含水率 soil moisture content; E/ET: 棵间蒸发占蒸发蒸腾量比例 soil evaporation/evapotranspiration; LAI: 叶面积指数 leaf area index; SN: 穗数 spike number; TKW: 千粒重 thousand kernel weight; GY: 籽粒产量 grain yield; WUE_s: 土壤水分利用率 soil water use efficiency; WUE_i: 灌溉水分利用率 irrigation water use efficiency.

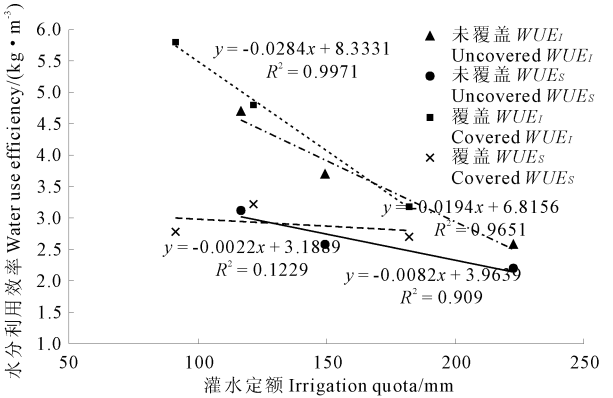


图 6 水分利用效率与不同灌水定额的关系
Fig.6 Relationships between different WUE and different irrigation quota

2.5.3 覆盖及灌水量与各指标间相关性分析 由表 5 可知,秸秆覆盖处理对地表土壤温度、棵间蒸发、穗数表现出显著的负相关(P < 0.05),与 E/ET 呈较显著负相关(P < 0.1),而与叶面积指数、千粒重呈显著的正相关(P < 0.05),与灌溉水分利用率呈较显著正相关(P < 0.1)。这表明整体上看秸秆覆盖处理可明显增加叶面积和千粒重,有效减少棵间蒸发,提高灌溉水分利用率,但也会明显降低土壤表层温度和减少冬小麦穗数。

不同的灌水量处理则对土壤水分利用率、灌溉水分利用率均表现出显著的负相关($P < 0.05$),与千粒重有较显著负相关关系($P < 0.1$),与土壤含水率、 E/ET 、产量呈显著正相关($P < 0.05$),与穗数呈较显著正相关($P < 0.1$)。这表明随着灌溉量的增加,水分利用效率明显下降,而土壤含水量和棵间蒸发所占比例都有明显上升,产量上升明显,同时会增加冬小麦穗数并减小千粒重,这与贾殿勇等^[20]的研究结果一致。

3 结 论

1) 秸秆覆盖可以有效减少棵间蒸发量,而滴灌条件下灌水量差异对 E 的影响不明显。较大降水量情况下覆盖处理 E 反而变化更剧烈,原因可能是与秸秆本身孔隙度较大,随天气放晴蒸发更快从而拉动土壤蒸发。

2) 对土壤含水率而言,灌水量过低时,秸秆覆盖对灌溉水有明显的截留作用,0 ~ 20 cm 土壤含水率反而会低于未覆盖处理,当灌水量超过一定数额后,秸秆覆盖的保墒作用则更加显著。整体上秸秆覆盖有助于增大土壤含水率。随着土层的加深,土壤含水率波动减缓。

3) 秸秆覆盖在低、中灌水量处理下,降温作用明显。在应对较大降雨造成的土壤温度骤降时,秸秆覆盖处理的波动幅度均小于未覆盖处理。

4) 整个观测期 E/ET 经历由大变小再变大的过程,与 LAI 波动呈相反趋势。滴灌 E/ET 整体低于华北地区传统灌溉的 E/ET (26% ~ 33%)^[21-22],秸秆覆盖下的 E/ET 均有减少。LAI 变化整体上覆盖处理大于未覆盖处理。

5) 秸秆覆盖提升了滴灌冬小麦的千粒重,而低灌水量明显使产量降低。未覆盖处理水分利用效率与灌水定额呈高度负相关,覆盖处理土壤水分利用效率随灌水定额而先增大后减小。整体上看,中灌水量覆盖处理(D₃)产量和水分利用效率均表现较优,适合在该地区推广。

参 考 文 献:

[1] 王 健,蔡焕杰,陈 凤,等.夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J].水利学报,2004,35(11):108-113.
[2] 康绍忠,杜太生,孙景生,等.基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J].水利学报,2007,38(6):661-667.

[3] Risheng Ding, Ling Tong, Fusheng Li, et al. Variations of crop coefficient and its influencing factors in an aridadvective cropland of north-west China[J]. Hydrological Processes, 2015,29(2):239-249.
[4] Wang J D, Gong S H, Xu D, et al. Impact of drip and level - basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. Irrigation Science, 2013,31(5):1025-1037.
[5] 谢小清,章建新,段丽娜,等.滴灌量对冬小麦根系时空分布及水分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2015,35(7):971-979.
[6] 王建东,龚时宏,高占义,等.滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):68-73.
[7] Zhang Y, Kang S, Ward E J, et al. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(8):1207-1214.
[8] 高凤莲.农田土壤水分时空变异特征及水量平衡分析[D].北京:中国农业大学,2004.
[9] 于稀水,廖允成,袁 泉,等.秸秆覆盖条件下冬小麦棵间蒸发规律研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):58-61.
[10] 王海霞,孙红霞,韩清芳,等.免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(4):1025-1030.
[11] 王兆伟,郝卫平,龚道枝,等.秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J].中国农业气象,2010,31(2):244-250.
[12] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙港流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013,39(9):1687-1692.
[13] 张彦群,王建东,龚时宏,等.滴灌条件下冬小麦田间土壤蒸发的测定和模拟[J].农业工程学报,2014,30(7):91-98.
[14] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦 - 夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
[15] 陈 静,王迎春,李 虎,等.滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1966-1975.
[16] 周 杨,王秀茹,张彦群,等.滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米土壤水分的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):309-313,319.
[17] 陈素英,张喜英,等.秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J].灌溉排水学报,2004,23(4):32-36.
[18] 李 杰,陈 锐,吴杨焕,等.北疆地区滴灌冬小麦农田蒸散特征[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):31-37,80.
[19] 史宝成,刘 钰,蔡甲冰.不同供水条件对冬小麦生长因子的影响[J].麦类作物学报,2007,27(6):1089-1095.
[20] 贾殿勇.不同灌溉模式对冬小麦籽粒产量、水分利用效率和氮素利用效率的影响[D].济南:山东农业大学,2013.
[21] 孙景生,康绍忠,王景雷,等.沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(11):28-32.
[22] 康绍忠,许 迪.我国现代农业节水高新技术发展战略的思考[J].中国农村水利水电,2001,(10):25-29.