

北疆地区滴灌冬小麦农田蒸散特征

李杰¹, 陈锐¹, 吴杨焕¹, 杨平¹, 崔静¹,
贾彪², 郑重¹, 马富裕¹

(1. 石河子大学农学院, 兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003;

2. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 于石河子大学灌溉试验站运用大型称重式蒸渗仪和小型裸间蒸发器开展滴灌冬小麦田间控水试验, 设置3个灌量处理(W1=375 mm、W2=600 mm、W3=750 mm), 旨在探明北疆地区滴灌冬小麦生育期农田蒸散与裸间蒸发特征。结果表明: 滴灌冬小麦产量随灌量的增加呈显著增加趋势, 但W2(8 450 kg·hm⁻²)与W3(8 670 kg·hm⁻²)处理间差异不显著; 水分利用效率以W2处理最大(1.4 kg·m⁻³), 显著高于W3和W1处理; 滴灌冬小麦全生育期蒸散量随灌量增加而增加, 介于412.3~707.6 mm, 其中裸间蒸发量占蒸散量的27.9%~29.1%。表层土壤含水率和叶面积指数对裸间土壤蒸发影响明显, 二者与裸间土壤蒸发占耗水比例均有良好的指数函数关系。深入分析表明, 北疆地区滴灌冬小麦高产高效实现背景下生育期内的耗水特征为: 生育期内耗水强度播种~越冬为1.0 mm·d⁻¹、越冬~返青为0.3 mm·d⁻¹、返青~拔节为2.6 mm·d⁻¹、拔节~抽穗为6.3 mm·d⁻¹、抽穗~乳熟为6.6 mm·d⁻¹、乳熟~成熟为6.2 mm·d⁻¹。

关键词: 北疆地区; 滴灌; 冬小麦; 蒸散量; 裸间蒸发

中图分类号: S275.6; S152.7+3 **文献标志码:** A

Evapotranspiration in a drip-irrigated winter wheat field in Northern Xinjiang

LI Jie¹, CHEN Rui¹, WU Yang-huan¹, YANG ping¹, CUI Jin¹, JIA Biao², ZHENG Zhong¹, MA Fu-yu¹

(1. College of Agronomy, Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Bingtuan,

Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Micro-lysimeters and a large weighing lysimeter were used to measure evapotranspiration (*ET*) of a drip-irrigated winter wheat field at the Irrigation Experimental Station of Shihezi University. The treatments of irrigation amount (W1 = 375 mm, W2 = 600 mm, and W3 = 750 mm) were conducted in order to develop an efficient drip irrigation system in Xinjiang. The results showed that winter wheat yield increased significantly as the irrigation amount increased; however the difference in yield between W2 treatment (8 450 kg·hm⁻²) and W3 treatment (8 670 kg·hm⁻²) was not significant. W2 treatment had the highest water use efficiency (1.4 kg·m⁻³) in this study, being significantly higher than that in W3 treatment and W1 treatment. Total *ET* increased as the irrigation amount increased. Total *ET* varied between 412.3 mm and 707.6 mm. Depending on the treatment and the year, soil evaporation accounted for 27.9% to 29.1% of the total *ET*. The water content of the surface soil and the leaf area index of the wheat crop both had significant effects on evaporation. Furthermore, both variables were exponentially related to the proportion of irrigation water that evaporated from the soil. The amounts of water consumption to obtain high winter wheat yields were as follows: seeding to overwintering, 1.0 mm·d⁻¹; overwintering to regreening, 0.3 mm·d⁻¹; regreening to jointing, 2.6 mm·d⁻¹; jointing to heading, 6.3 mm·d⁻¹; heading to milk, 6.6 mm·d⁻¹; and milk to maturity, 6.2 mm·d⁻¹.

Keywords: Northern Xinjiang; drip-irrigated; winter wheat; evapotranspiration; evaporation

蒸散 (Evapotranspiration, *ET*) 是“大气—土壤—作物”水循环过程中农田水分平衡的重要组成部分, 也

是热量平衡中重要能量支出部分, 对作物生长发育和产量具有重要影响^[1-2]。农田蒸散包括植株蒸腾

收稿日期: 2014-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(31160260)

作者简介: 李杰(1988—), 男, 甘肃通渭人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉。E-mail: lj880902@126.com。

通信作者: 马富裕(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事作物生理生态研究。E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn。

1.3 蒸渗仪法实际蒸散量的计算

蒸渗仪是根据水量平衡原理设计的一种用来测量农田水文循环各主要成分的专门仪器,计算方法:

$$ET_i = P_{0i} + I_i - \Delta W_{si}$$

式中, ET_i 是第 i 阶段内的蒸散量; P_{0i} 是第 i 阶段内的有效降雨量; I_i 是第 i 阶段内的灌水量; ΔW_{si} 是第 i 阶段内土壤储水量的变化。

1.4 有效降雨量的测定

有效降雨量采用联合国粮农组织(FAO)推荐的经验公式计算,公式如下:

$$P_0 = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 (TP < 50 \text{ mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 (TP > 50 \text{ mm}) \end{cases}$$

式中, P_0 为有效降水量(mm); TP 为总的降雨量(mm)。

1.5 测定项目及方法

1.5.1 农田蒸发蒸腾量获取 采用建于田间的大型称重式蒸渗仪来测定,其测定田间蒸散量的有效面积为 4 m^2 ,该系统主要包括土体系统、称质量系统、供排水系统和数据采集系统,自动采集储存数据,采集步长为 1 h ,精度为 0.05 mm 。

1.5.2 棵间蒸发量测定 棵间蒸发采用置于小麦行间的小型棵间蒸发器测定,每个处理设 3 个规格相同的棵间蒸发器,取其测定值的平均值。小型棵间蒸发器由外桶(直径 110 mm 、高 200 mm 、不封底)和内桶(内径 90 mm 、高 200 mm 、壁厚 2 mm)两部分组成,材料为聚氯乙烯(PVC)管。外桶是固定的,内桶可取出,为使桶内土壤水分与大田一致,内桶的侧壁均匀地打有许多小孔。在小麦种植后,将外桶和内桶分别垂直地放置入试验区中,并使其顶面与地面齐平,减少对内桶土壤的扰动,使其与田间的土壤尽量保持一致,用精度 0.001 kg 的电子天平称重,得到单位时间内的棵间蒸发量。

1.5.3 土壤水分数据采集 利用采集器 5ET(In American Decagon Devices)来获得土壤水分数据,测定步长为 1 天测 1 次,测定土壤深度为 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 80$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 和 $100 \sim 150 \text{ cm}$ 。

1.5.4 叶面积指数测定 每隔 12 d 在各小区取生长状况良好、长势基本一致的小麦各 10 株,用 LI-300C(LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA)叶面积仪测定植株叶面积,取其平均值,计算叶面积指数(LAI)。

1.6 水分利用效率

水分利用效率(WUE):小麦消耗 1 体积水量所生产的谷物产量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

1.7 数据处理

试验数据采用 SPSS16.0 软件进行统计分析,处

理间在 5% 水平上的差异用最小极差法(LSD)比较,作图采用 OriginPro 8.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 灌溉量对土壤水分含量的影响

冬小麦返青后灌水和降雨后的土壤水分变化过程由图 1 可以看出,随着土层深度的增加,土壤水分含量在灌前和灌后的波动越来越小。对于 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层来说,灌溉前和灌溉后土壤水分的波动区间分别为 $13\% \sim 27\%$ 和 $12\% \sim 25\%$,而对于 $60 \sim 100 \text{ cm}$ 和 $100 \sim 150 \text{ cm}$ 土层,整个生育期内的土壤含水量灌前和灌后波动较小,仅为 $10\% \sim 14\%$,特别对 $100 \sim 150 \text{ cm}$ 土层来讲,整个生育期内的土壤水分含量基本处于一个恒定值。表明冬小麦在滴灌条件下, 1 m 以下的深层渗漏量几乎可以忽略。在各个处理间,随着灌溉强度的增加,灌前和灌后的波动越大,在抽穗~乳熟阶段,W3 处理在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的波动范围为 $14\% \sim 28\%$ 和 $13\% \sim 24\%$,W2 为 $13\% \sim 25\%$ 和 $12\% \sim 22\%$,W1 为 $10\% \sim 21\%$ 和 $11\% \sim 18\%$ 。从整个生育期来讲,W3 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的平均土壤体积含水量为 24% 和 22% ,W2 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的平均土壤体积含水量为 21% 和 19% ,W1 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的平均土壤体积含水量为 16% 和 14% 。W3 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层灌前的土壤体积含水量为 17% ,灌溉后为 28% 。W2 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层灌前的土壤体积含水量为 14% ,灌溉后为 25% ,而 W1 处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层灌前的土壤体积含水量为 11% ,灌溉后为 20% 。

2.2 灌溉量对冬小麦产量及水分利用效率的影响

由表 2 可见,有效穗粒数、千粒重、产量随着灌水量的增加而增加,当灌量由 600 mm (W2)增加到 750 mm (W3)时,产量增加不显著,灌水利用效率和水分利用效率反而下降。W1 和 W2、W3 处理间有效穗数、结实率、千粒重、产量均存在显著($P < 0.05$)差异,W2 和 W3 无显著差异。3 个处理中,W1 的产量最低,仅为 $5197 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,W2 和 W3 处理的产量达到了 $8453 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8673 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,没有显著差异。各处理中 W1、W2 的灌溉水利用效率较高,达到 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,水分利用效率为 $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;W3 处理的灌溉水利用效率和水分利用效率最低,为 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。尽管 W1、W2 灌溉水利用效率没有差异,但在 W1 处理下产量较低。说明过量灌溉和干旱胁迫均不利于水分利用效率和产量提高。

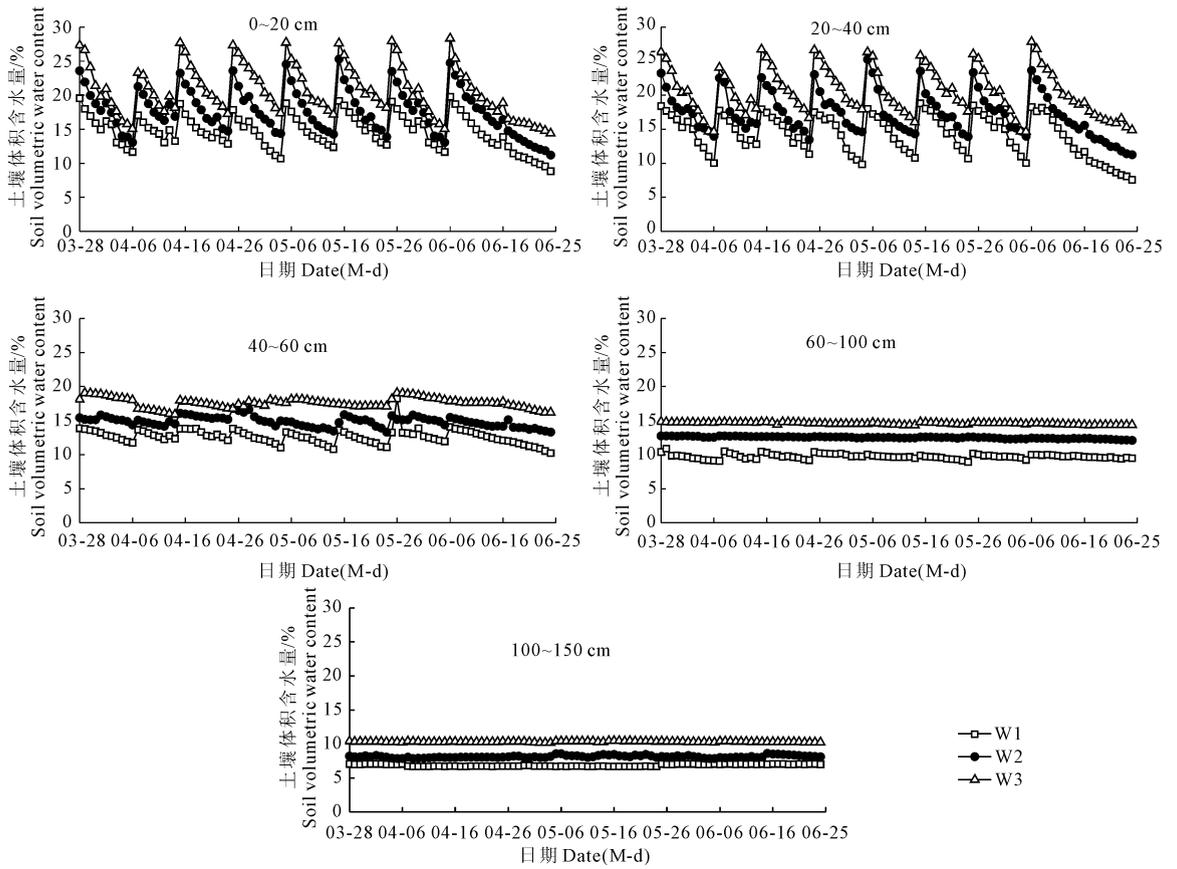


图 1 冬小麦返青后不同处理下土壤水分的变化

Fig.1 The volumetric soil water contents of different treatments from recovering stage to maturity stage

表 2 不同滴灌量处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

Table 2 Effects of drip irrigations on grain yield and water use efficiency in winter wheat

处理 Treatments	有效穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting percentage /%	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·m ⁻³)	灌溉水利用效率 Irrigation use efficiency /(kg·m ⁻³)
W1	41.2 ± 2.5b	0.85 ± 0.03b	46.7 ± 1.5b	5197 ± 66b	1.3 ± 0.02a	1.4 ± 0.02a
W2	52.4 ± 1.9a	0.88 ± 0.02a	52.4 ± 0.82a	8453 ± 67a	1.3 ± 0.01a	1.4 ± 0.01a
W3	54.8 ± 1.6a	0.85 ± 0.03a	54.0 ± 2.15a	8673 ± 85a	1.1 ± 0.01b	1.2 ± 0.01b

注:同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平的显著差异。

Note: Data in the same column followed by different lower-case letters are significantly different at $P < 5\%$.

2.3 滴灌冬小麦农田蒸散量变化特征

利用大型称重式蒸渗仪和小型棵间蒸发器得到不同水分处理各生育阶段滴灌冬小麦农田蒸散量,由表 3 可以看出,W1、W2、W3 处理冬小麦生育期内总蒸发蒸腾总量分别为 412.3、620.5、707.6 mm,棵间土壤蒸发量分别 120.3、176.3、206.1 mm。从整个生育阶段来看,播种~越冬期,播后同时滴水,不同水分处理棵间蒸发量和蒸散量差异不大,由于小麦苗较小,基本属裸土蒸发阶段,棵间土壤蒸发量占阶段蒸散量的百分比达 80%。返青~拔节期,蒸发量占阶段蒸散的百分比明显降低,3 个处理分别为

32.9%、39.3%、41.2%,植株蒸腾耗水超过棵间土壤蒸发;拔节~抽穗期,田间耗水以植株蒸腾为主,棵间土壤蒸发量占阶段蒸散量的百分比分别减小为 17.4%、19.4%、20.3%;抽穗~乳熟期,棵间蒸发占阶段耗水量的百分比降至最低点,仅为 8.4%、11.0%、11.9%,田间耗水主要用于植株蒸腾,为作物产量形成奠定基础;乳熟~成熟期棵间蒸发占阶段耗水量的百分比上升。滴灌冬小麦棵间蒸发量占阶段蒸散量百分比播种~越冬期最高,均在 80% 以上;而进入返青期以后,随着冬小麦的生长,叶面积指数增加,百分比开始降低,到抽穗~乳熟期达到最

低,而乳熟后随着小麦叶片开始衰老、变干、变黄、地面覆盖逐渐减少,植株蒸腾降低,棵间土壤蒸发量占总蒸散水量的比例又有所上升。全生育期内 3 个处理 W1、W2、W3 冬小麦棵间蒸发量占总蒸散量百分比为 27.9%、28.4%、29.1%,日均蒸散量为 1.5、2.3、2.6 mm·d⁻¹,日蒸散强度抽穗~乳熟期最高,分

别为 4.8、6.6、7.5 mm·d⁻¹。在整个生育期,在越冬~返青阶段日均蒸发蒸腾量达到最低点分别为 0.2、0.3、0.3 mm·d⁻¹,这是因为在越冬期内大气温度低,冬小麦的生长缓慢甚至停滞,加上越冬期进行冬灌使土壤表层冻结从而使蒸散量最低。

表 3 冬小麦返青后各生育期间蒸发占耗水量的比例

Table 3 Ratios of soil evaporation to evapotranspiration at growing stage of winter wheat

处理 Treatments	项目 Items	播种~越冬 Seeding~ overwintering	越冬~返青 Overwintering~ recovering	返青~拔节 Recovering~ jointing	拔节~抽穗 Jointing~ heading	抽穗~乳熟 Heading~ milky ripe	乳熟~成熟 Milky ripe ~ mature	全生育期 The whole stage
		09-26— 11-13	11-14— 03-17	03-18— 04-14	04-15— 05-10	05-11— 06-07	06-08— 06-27	09-26— 06-27
W1	$P_0 + I/\text{mm}$	102.2	16.35	75.35	112.6	76.1	35	417.6
	ET/mm	51.9	26.6	50.4	83.2	128.7	71.5	412.3
	$ET_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	1.0	0.2	1.9	3.2	4.8	3.6	1.5
	E/mm	41.7	19.3	18.6	15.5	10.8	13.5	120.3
	$E_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.8	0.2	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4
	$E/ET/\%$	80.3	72.5	32.9	17.4	8.4	17.4	27.9
W2	$P_0 + I/\text{mm}$	159.2	16.35	117.35	175.6	131.1	56	642.6
	ET/mm	52.2	32.6	69.9	162.5	178.6	124.6	620.5
	$ET_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	1.0	0.3	2.6	6.3	6.6	6.2	2.3
	E/mm	42.0	25.8	27.5	31.5	19.6	29.8	176.3
	$E_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.8	0.2	1.0	1.1	0.9	1.2	0.7
	$E/ET/\%$	80.5	79.2	39.3	19.4	11.0	23.9	28.4
W3	$P_0 + I/\text{mm}$	205.2	16.35	143.35	214.6	144.1	69	792.6
	ET/mm	52.6	38.5	93.8	180.8	201.3	140.5	707.6
	$ET_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	1.0	0.3	3.5	7.0	7.5	7.0	2.6
	E/mm	42.6	30.2	38.7	36.7	24.0	33.9	206.1
	$E_d/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.8	0.3	1.4	1.4	1.0	1.7	0.8
	$E/ET/\%$	81.0	78.4	41.2	20.3	11.9	24.1	29.1

注: $P_0 + I$ 表示有效降雨量和灌溉量、 ET 表示总耗水量、 E 表示棵间蒸发。

Note: $P_0 + I$, ET and E represent effective rainfall and irrigation, evapotranspiration, evaporation, respectively.

不同灌量处理滴灌冬小麦棵间土壤日蒸发量变化见图 2,不同灌水处理灌溉后棵间土壤日蒸发量不同,但对于不同的灌溉处理,蒸发强度在整个时间段内变化趋势是一致的,呈脉冲式变化,均在灌水和降雨后明显升高,然后呈下降趋势。3 个处理在返青到成熟期,棵间土壤日蒸发量逐渐至抽穗~灌浆期最低,之后又逐渐升高。不同处理棵间土壤日蒸发量表现为 $W3 > W2 > W1$,各处理在灌溉后 1~4 d 内棵间蒸发波动最大,随后棵间蒸发量波动趋于稳定;不同处理灌溉后 1~4 d 内棵间日蒸发变化不同,W1 从 1.6 mm·d⁻¹ 左右下降到 0.8 mm·d⁻¹、W2 从 2.4 mm·d⁻¹ 下降到 1.4 mm·d⁻¹、W3 从 2.7 mm·d⁻¹ 左右下降到 1.5 mm·d⁻¹ 左右;灌溉 4 d 之后各处理棵间

蒸发维持在 1.0 mm·d⁻¹ 以下,一般在 0.3~0.8 mm·d⁻¹ 范围内波动,且 W1 蒸发量明显低于 W2 和 W3,而 W2 和 W3 没有明显差异。

2.4 棵间土壤蒸发占耗水比例与叶面积指数和土壤表层含水率的关系

作物覆盖度和土壤表层含水量是影响棵间蒸发的两个重要因素,地面灌溉条件下,有关学者提出了描述棵间土壤蒸发占耗水比例与叶面积指数和土壤表层含水量的经验关系式^[17]。本研究中,棵间蒸发占耗水比例(E/ET)与作物叶面积指数(LAI)关系见图 3,由实测资料回归分析得出 E/ET 和 LAI 之间存在指数函数关系且决定系数(R^2)呈现出极显著的相关性。棵间土壤蒸发占耗水的比例 E/ET 随

着叶面积指数 LAI 的增加而减小;从回归曲线可以看出,当 $0 < LAI < 3.0$ 时,棵间土壤蒸发强度 E/ET 随 LAI 的增加而显著下降,当 $LAI > 3.0$ 时,曲线变得平缓, E/ET 随 LAI 增加而减小的速率变慢。回归关系式为:

$$E/ET = 107.37e^{-0.354LAI} (R^2 = 0.973)$$

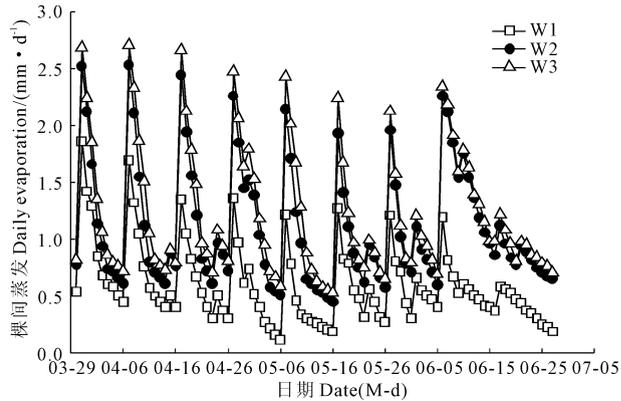


图 2 灌溉后各处理棵间蒸发的变化

Fig.2 Changes of daily soil evaporation of different treatments after irrigating

由图 4 可知,棵间土壤蒸发占耗水比例(E/ET)随表层土壤含水率增加而增大,当表层土壤水分较高时, E/ET 较大,此后, E/ET 随着表层水分的散失而迅速下降,达到一个相对较低的稳定值。

当 $LAI < 1.0$ 时增大幅度明显高于 $LAI > 3.0$;这

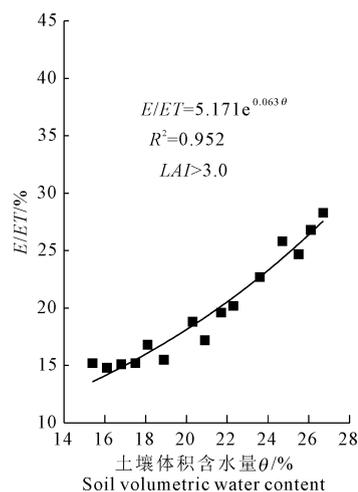
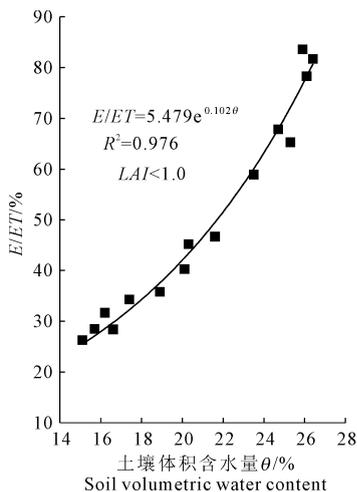


图 4 冬小麦棵间土壤蒸发占耗水比例与表层土壤含水量的关系

Fig.4 Relationship between the proportion of soil evaporation to evapotranspiration and soil water content

3 讨论

合理的灌溉制度是田间灌溉管理的关键,与传统灌溉相比,滴灌的灌水定额小灌溉频率高,可根据作物需水规律将水分和养分均匀持续地输送到植株

是由于 LAI 较小时,地表覆盖度低,接收辐射多,土壤失水速率快,蒸发强度 E/ET 大。当 LAI 较大时,由于地表覆盖度加大,小麦冠层对净辐射的截留,地面接收太阳辐射较少,加之作物冠层内的空气相对湿度较高,表层失水速率相对较慢,棵间土壤蒸发强度 E/ET 变小。当表层土壤含水率在 14% ~ 27% 之间时,滴灌冬小麦 E/ET 与表层土壤含水率之间有良好的指数函数关系,关系式如下:

当 $LAI < 1.0$ 时, $E/ET = 5.479e^{0.102\theta} (R^2 = 0.976)$

当 $LAI > 3.0$ 时, $E/ET = 5.171e^{0.063\theta} (R^2 = 0.953)$

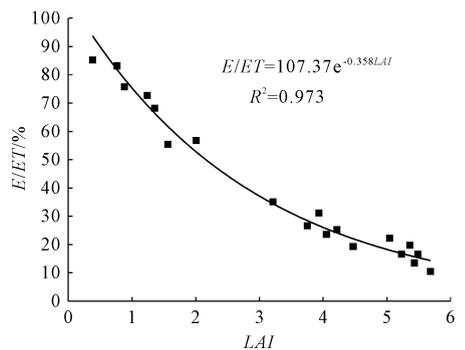


图 3 棵间土壤蒸发占耗水比例与叶面积指数间关系
Fig.3 Relationship between the proportion of soil evaporation to evapotranspiration and leaf area index

根部,提高水分利用效率。本研究表明不同灌水处理下,0 ~ 40 cm 土层土壤的含水量时空变化受灌溉水量影响明显,深层含水量波动不明显,说明滴灌能保持土壤表层湿润,避免水分深层渗漏,及时满足作物水分需求,对作物生长有较好的促进作用。同时

随着灌量的增加农田蒸散总量增加,这与相关研究结果一致^[18]。棵间土壤蒸发是农田蒸散的重要组成部分,不参与产量的形成,因此减少棵间土壤蒸发对提高冬小麦水分利用效率、节约灌溉用水具有十分重要的作用。前人研究表明,传统灌溉条件下,棵间土壤蒸发占蒸散总量的32%左右^[19],本研究表明滴灌模式下累积棵间蒸发随灌水量增加而增大,全生育期棵间土壤蒸发占蒸散量比例在27.9%~29.1%,棵间土壤蒸发在滴灌模式下明显低于非滴灌模式,这可能是由于传统灌溉使地表全部湿润,而滴灌由于局部灌溉特点,使地表局部湿润,抑制了棵间土壤蒸发,明显降低了棵间蒸发,说明滴灌比传统灌溉更能有效控制棵间土壤蒸发,减少无效水分消耗。但本研究蒸发蒸腾总量略高于华北和关中地区^[19],这可能与本地区的温度和气象因素有关,本区处于西北干旱地区,在小麦的整个生育时期内,本地区气温高、日照强度大、白昼时间长、黑夜短,植株呼吸蒸腾加大,致使蒸发蒸腾总量略高于其他地区,植株呼吸蒸腾较大所致。同时,作物冠层温湿度、地表温度以及风速等因素都会影响农田蒸散和棵间土壤蒸发,但本试验没有对这些因素加以考虑,因此,还需进一步探讨其他因素对蒸散规律的影响。

叶面积指数和表层土壤含水量是影响棵间土壤蒸发的两个主要因素,棵间土壤蒸发量随生育时期叶面积指数和表层土壤含水量的变化而变化。当表层土壤含水率在14%~27%时,滴灌冬小麦棵间蒸发占耗水量的百分比与表层土壤含水率之间呈指数函数曲线上升;同时,叶面积指数对土壤蒸发的影响很大,棵间蒸发占耗水量的百分比随冬小麦叶面积指数的增加而下降,二者之间呈指数函数关系,这与于利鹏、王幼奇等^[20-21]研究结论相一致。滴灌冬小麦棵间土壤蒸发主要发生在降雨或灌溉1~4 d表层土壤湿润时期内,之后随着地表变干,迅速下降并逐渐趋近于零。在不影响作物蒸腾的条件下,减少表层土壤的湿润面积是减少棵间土壤蒸发的一种主要措施。因此,在生产实际中,为达到节水目的,从减少蒸发耗水角度看灌溉实施中不应提倡小水勤灌,而应提倡局部湿润的大定额灌溉,尽量减少表层湿润的面积和缩短土壤表面湿润的时期,以减少棵间蒸发损失,提高农田水分的利用率,达到新疆滴管冬小麦节水增产的目的。

4 结 论

本研究通过3个灌水处理,研究了滴灌条件下冬小麦蒸散量、棵间土壤蒸发、土壤水分动态变化过

程及其影响因子,初步得到以下结论:

1) 滴灌冬小麦实现高产高效的耗水强度播种~越冬为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、越冬~返青为 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、返青~拔节为 $2.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、拔节~抽穗为 $6.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、抽穗~乳熟为 $6.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、乳熟~成熟为 $6.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2) 滴灌条件下,0~40 cm 土层土壤的含水量时空变化受灌溉水量影响明显,灌溉前后土壤体积含水量在14%~28%之间。

3) 棵间土壤蒸发量随着灌溉量的增加而增加,主要发生在降雨或灌溉1~4 d 表层土壤湿润时期内,之后随着地表变干,迅速下降并逐渐趋近于0。

4) 冠层覆盖度和土壤表层含水量是影响蒸发的两个关键因素,棵间土壤蒸发占蒸散总量的比例与叶面积指数和土壤表层含水量呈指数函数关系。

参 考 文 献:

- [1] 崔晓军,薛昌颖,杨晓光,等.不同水分处理旱稻农田蒸散特征和水分利用效率[J].农业工程学报,2008,24(4):49-54.
- [2] 张永久,马中明,邓斌,等.有限灌溉条件下春小麦的蒸散特征及其与产量的关系[J].麦类作物学报,2006,26(4):98-102.
- [3] 康绍忠,杜天生,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.
- [4] Liu C, Zhang X, Zhang Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):109-120.
- [5] 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.
- [6] Lu J, Ookawa T, Hirasawa T. The effects of irrigation regimes on the water use dry matter production and physiological responses of paddy rice[J]. Plant Soil, 2000,223:207-216.
- [7] 汪顺生,良军,高传昌,等.不同沟灌方式下夏玉米棵间蒸发试验[J].农业机械学报,2012,43(9):66-71.
- [8] 冯禹,崔宁博,魏新平,等.川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J].农业工程学报,2014,30(14):78-86.
- [9] 汪顺生,高传昌,王兴,等.不同灌溉方式下冬小麦耗水规律及产量的试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(4):11-14.
- [10] Beeson Jr R C. Weighting lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates[J]. Agriculture Water Management. 2011,98(6):967-976.
- [11] 刘斌,胡继超,张雪松,等.稻田逐时蒸散量的测定及其模拟方法的比较[J].灌溉排水报,2014,33(4/5):369-373.
- [12] 张俊俊,刘文兆,韩晓阳,等.陕西长武塬区冬小麦的蒸散特征[J].江苏农业科学,2013,41(12):60-63.
- [13] 余坤,冯浩,李正鹏,等.秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J].农业机械学报,2014,(10):116-123.

模型为高斯模型,土壤有效态铁的最优模型为线性模型。4 种有效态微量元素的块金效应值在 12.02% ~ 49.97% 之间,其中,有效态铜和铁具有强烈的空间相关性,有效态锌和锰具有中等的空间相关性;4 种微量元素的变程在 0.01 ~ 0.37 km 之间。

3) 徐水县土壤有效态微量元素空间分布规律:有效铜基本呈现西北与东南含量高而中部较低的趋势;有效锌和有效铁大体呈现岛状分布;有效锰的空间分布基本呈现由西北方向向东南方向递减的规律。基于 GIS 技术,生成各微量元素普通 Kriging 插值图,以及各分级的面积与比例,除有效铜含量处于偏高水平,其余 3 种微量元素均处于中等含量水平。

4) 土壤各养分含量对微量元素有重要影响。土壤中 Cu、Zn、Mn 均与有机质、碱解氮、有效磷和速效钾呈极显著的正相关性。4 种微量元素均与 pH 值呈现负相关关系,表明随着 pH 值的升高,各微量元素含量均呈下降趋势。其中 Fe 与 pH 值呈现极显著负相关关系,有相关研究发现,在 pH 值升高使土壤呈碱性的时候,Fe 离子逐渐转化为氢氧化物或氧化物,从而溶解度降低,使有效 Fe 含量减小。

参 考 文 献:

- [1] 董国涛,张爱娟,罗格平,等.三工河流域绿洲土壤微量元素有效含量特征分析[J].土壤,2009,41(5):726-732.
- [2] 牟金明,王明辉,宋 日,等.作物根茬留田对土壤有效微量元素动态的影响[J].吉林农业科学,1998,(1):59-61.
- [3] 陆景陵.植物营养学(上)[M].北京:中国农业大学出版社,2001.
- [4] 王红娟.我国北方粮食主产区土壤养分分布特征研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
- [5] 庞 夙,李廷轩,王永东,等.土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):114-120.

- [6] 秦占飞,常庆瑞.县域土壤养分空间变异分析—以蒲城县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):30-35.
- [7] 王丹丹,岳书平,林芬芳,等.东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应[J].土壤学报,2012,49(4):625-635.
- [8] 刘世梁,郭旭东,连 纲,等.黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析—以横山县为例[J].水土保持学报,2005,19(5):105-108.
- [9] 张世熔,孙 波,赵其国,等.南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J].土壤学报,2007,44(5):885-892.
- [10] 王志刚,赵永存,黄 标,等.采样点数量对长三角典型地区土壤肥力指标空间变异解析的影响[J].土壤,2010,42(3):421-428.
- [11] ZHU and H. S. LIN. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes[J]. Pedosphere, 2010,20(5):594-606.
- [12] Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation[M]. New York: Oxford University Press. 1997.
- [13] 赵永存,黄 标,孙维侠,等.张家港土壤表层铜含量空间预测的不确定性评价研究[J].土壤学报,2007,44(6):974-981.
- [14] 雷能忠,王心源,蒋锦刚,等.基于 BP 神经网络插值的土壤全氮空间变异[J].农业工程学报,2008,24(11):130-134.
- [15] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等.采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J].土壤通报,2012,41(2):257-262.
- [16] 中华人民共和国农业部. NY/T 1634 - 2008. 耕地地力调查与质量评价技术规程[S].北京:中国农业出版社,2008.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 刘付程,史学正,于东升,等.基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究—以土壤全氮制图为例[J].土壤学报,2004,41(1):20-27.
- [19] 刘贤超,衣华鹏.渭北旱塬土壤水分空间变异性[J].山地学报,2004,22(5):521-527.
- [20] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994,58(5):1501-1511.
- [21] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕,等.黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):36-42.

(上接第 37 页)

- [14] 张 娜,张永强,李大平,等.滴灌量对冬小麦光合特性及干物质积累过程的影响[J].麦类作物学报,2014,34(6):795-801.
- [15] 程裕伟,马富裕,冯治磊,等.滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):112-117.
- [16] 王冀川,徐雅丽,高 山,等.滴灌条件下根区水分对春小麦根系分布特征及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):21-26.
- [17] 樊引琴,蔡焕杰,王 健,等.冬小麦田棵间蒸发的试验研究[J].灌溉排水,2000,19(4):1-4.
- [18] Lei H M, Yang D W. Interannual and seasonal variability in evapo-

- transpiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(4):581-589.
- [19] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等.华北平原冬小麦田间蒸散与棵间蒸发的变化规律研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):62-64.
- [20] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌冬小麦耗水与棵间蒸发试验[J].中国农业科学,2009,42(9):3179-3186.
- [21] 王幼奇,樊 军,邵明安.陕北黄土高原雨养区谷子棵间蒸发与田间蒸散规律[J].农业工程学报,2010,26(1):6-10.