



小麦玉米间作和氮肥对作物耗水特性及水分利用的影响

李倩倩^{1,2}, 王星运¹, 李孟浩^{1,2}, 陈小莉^{1,2}, 任小龙^{1,2}, 赵西宁³

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 通过大田试验,在半湿润区雨养条件下研究小麦玉米间作种植与单作种植在两个氮肥水平下的阶段耗水量、土面蒸发特征及水分利用效率,探究间作系统中各组成作物的耗水特性以及氮肥对水分利用的调节作用。研究表明,间作种植模式可增加小麦耗水量、全生育期土面蒸发量与土面蒸发量占耗水量的比例(E/ET),而降低玉米耗水量。在同一种植模式下,施氮处理增加作物耗水量,同时降低全生育期土面蒸发量与土面蒸发量占耗水量的比例,说明施氮能适当地增加土壤水分的有效性。与单作相比,间作使小麦在施氮时产量、水分利用效率分别提高 33.20% 与 12.15%,在不施氮时较单作小麦产量、水分利用效率分别提高 26.97% 与 23.81%;玉米间作与单作种植对产量的差异不显著,但显著提高水分利用效率,在施氮时和不施氮情况下分别提高 8.37% 和 10.06%。在同一种植模式下,施氮处理同时增加小麦和玉米的产量与水分利用效率。因此,可在半湿润区适当发展施氮处理的间作种植模式,以提高作物的水分利用效率和达到作物高产。

关键词 间作;耗水;土面蒸发;水分利用效率

中图分类号 S512.1;S513

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)06-0819-10

间作是一种在世界范围内广泛种植的传统农业。近年来,国内外研究者表明,间作是一种可持续农业发展模式,在应对全球气候变化和粮食安全等方面倍受关注^[1]。合理的间作比单作种植更易获得高产稳产^[2-4],提高水分利用效率^[5]。在有限的自然资源条件下,间作如何最大限度地提高利用效率而备受关注。陕西关中地区光热资源优越,灌区耕地 83.2 万 hm^2 ,占全省耕地面积 22.9%(陕西省农业的基本分布情况,2012)。该区域典型的“冬小麦—夏玉米”一年两熟种植模式,降水时期与作物需水关键期严重错位,这一矛盾导致该区水资源利用率低,农业资源利用不合理。因此,在农业生产过程中,尤其是在雨养条件下,应更加重视农业用水的有效性。

雨养农业是节约农业用水的重要途径,世界上 80% 的可耕地和 60% 的粮食都是雨养农业^[6]。目前,随着水资源短缺对农业生产的限制^[7],如何有效配置有限的降水提高作物对水分的高效利用,实现增产稳产节水技术途径迫切需要进一步研究。间作通过群体内组成作物的需水关键期的

错位缓解用水矛盾,在一定程度上提高水资源利用效率,被广泛应用于一熟灌区以及西南地区,而半湿润区有关研究很少。有关研究表明,“冬小麦春玉米间作”种植模式,其土地生产率高而且最大限度利用降水,在半湿润区亦具有较好的发展前景^[8]。本试验重点探讨该区小麦玉米间作和单作种植在两个氮肥水平下间作群体内各组成作物的水分消耗特性,分析土面蒸发特征和水分利用在不同生育时期的动态变化,以揭示其耗水机理,为促进间作水分利用研究提供借鉴。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2018—2019 年在中国陕西杨凌中国旱区节水农业研究院(34°18'N,108°04'E)进行,处于半湿润区,海拔为 467 m,该区年平均气温为 13 °C,年均日照时数为 2 196 h,无霜期 220 d。近 30 a 平均降水量为 521 mm 左右,年蒸发量 993.2 mm,年内降雨分配不均,干旱指数为 1.3~1.59。土壤质地类型为粉质粘壤土,土壤颗

收稿日期:2020-09-02 修回日期:2020-09-23

基金项目:国家自然科学基金(31871562)。

第一作者:李倩倩,女,硕士研究生,研究方向为作物栽培。E-mail:2640856324@qq.com

通信作者:陈小莉,女,博士生导师,副教授,主要从事旱区养分高效利用与旱区节水方面的研究。E-mail:cxlrxl@aliyun.com

粒组成为<0.01 mm 粒级占 51.9%,0.01~0.05 mm 占 42.3%,0.05~2 mm 占 5.8%。试验田 0~30 cm 耕层土壤化学性状如表 1 所示,耕层土壤体积质量 1.35 g/cm³,田间持水量为 24%,pH 8.25。气象资料(气温和降水量)由现场农业气象站每 0.5 h 记录 1 次(Vantage Pro2,Davis Instruments, Hayward, CA, USA),试验期的气温和降水量见图 1。

1.2 试验设计与田间管理

供试材料为当地主栽冬小麦品种‘小偃 22 号’(*Triticum aestivum* L. cv. ‘Xiaoyan 22’),春玉米品种为‘郑单 958’(*Zea mays* L. cv. ‘Zhengdan 958’)。试验设种植模式和氮水平 2 个试验因素。其中种植模式(P)设单作种植和小麦/玉米间作 2 种模式,氮肥(N)设施肥和不施肥 2 个水平。试验处理设有不施氮单作小麦(SW0)、不施氮单作玉米(SM0)、施氮单作小麦(SW1)、施氮单作玉米(SM1)、不施氮小麦玉米间作(IW0、IM0)、施氮小麦玉米间作(IW1、IM1),每个处理重复 3 次,田间随机排列。在小麦播前

对该地进行耕作并划分为 18 个小区,每个小区的面积为 105 m²(10.5 m×10 m)。小麦行距 20 cm,播种密度 360 万粒/hm²。玉米行距 50 cm,株距 30 cm,播种密度为 66 667 株/hm²。在间作小区中相邻的小麦和玉米行距为 30 cm,由 3 条完整的小麦/玉米套作条带组成,带向南北,每个条带由 8 行小麦(条带 1.6 m 宽)和 4 行玉米(条带 1.9 m 宽)组成(如图 2 所示),小麦和玉米分别占套作小区面积的 46%和 54%。

小麦单位面积施氮量(纯 N)150 kg/hm² 和不施肥,作为基肥一次性施入。玉米施氮量(纯 N)235 kg/hm²,基肥施 50%,追肥 50%。小麦、玉米施磷、钾量分别为 180 kg/hm²、39 kg/hm²,氮磷钾肥料分别用尿素(N:46%)、过磷酸钙(P₂O₅:16%)和矿物质硫酸钾(K₂O:20%)。小麦于 2018 年 10 月 11 日人工开沟条播,2019 年 6 月 7 日收获,春玉米于 2019 年 4 月 9 日播种,2019 年 8 月 18 日收获,两种作物共生期长 58 d。

除草、施肥和其他的田间管理依照当地习惯进行。

表 1 土壤化学性状

Table 1 Soil chemical properties

深度/cm Depth	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K	速效氮/(mg/kg) Available N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	有机质/(g/kg) Humus
0~30	1.29	1.13	5.88	58.5	47.24	107.57	12.22

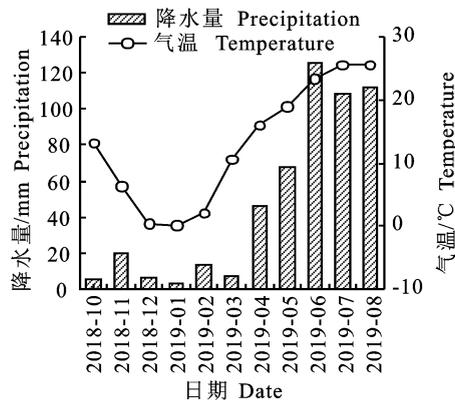


图 1 试验期间月均气温和降水量
Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation

1.3 测定指标

1.3.1 土壤水分含量的测定 于小麦和玉米播种和收后用烘干法测定 0~200 cm 土层土壤水分含量,每 10 cm 为 1 个土层。单作每个小区取 2 个重复点,间作每个小区的测定值为小麦带中间、玉米带中间及小麦玉米边界 3 点,每个点重复取 2 次。

1.3.2 土面蒸发量 用微型蒸渗仪(ML)测定,蒸渗仪统一用内径 10.4 cm,高 15 cm 的 PVC 管制成,底部用纱网封堵。为保证操作方便且不破坏周围土体结构,用内径 11.5 cm 的镀锌铁皮制成外套,固定于土体中,使其表面与附近土壤持平,操作时不破坏周围土体结构,亦须采取缓冲措施。为保持测量精度,每 3 d 更换 1 次原状土,降雨后微型蒸渗仪内易产生积水,需立即更换。测定时间为每日 8:00—8:30,用精度为 0.1 g 的电子天平称其质量。单作处理在每个小区中心布置 2 个微型蒸渗仪;间作处理分别在种植带中部、小麦玉米间行以及这两点距离的中部各布置 1 个微型蒸渗仪(图 2),3 个平均值作为间作小麦和间作玉米的土面蒸发量。微型蒸渗仪中土样每减少 1 g 相当于蒸发水分 0.105 1 mm^[9]。

1.3.3 耗水量 可根据下式计算出耗水量: $ET = E + T + E_{Cl}$,式中,ET 为耗水量 (mm);E 是用微型蒸渗仪测得的土壤水分蒸发量(mm);T 是用包裹式茎流计测得的蒸腾量(mm);E_{Cl} 是冠

层截留量的蒸发量 (mm)。其中, T 和 E_{cl} 根据 Ma 等 [6] 介绍的方法进行测量。

1.3.4 水分利用效率 作物产量 $Y(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 与农田耗水量 $ET(\text{mm})$ 的比值, 即:

$$WUE = Y/ET$$

其中, 作物产量是在完全成熟时人工收获的

籽粒产量。

1.4 数据整理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 21.0 进行数据处理和统计, 5% 显著水平, 并用 Origin 2016 进行绘图。

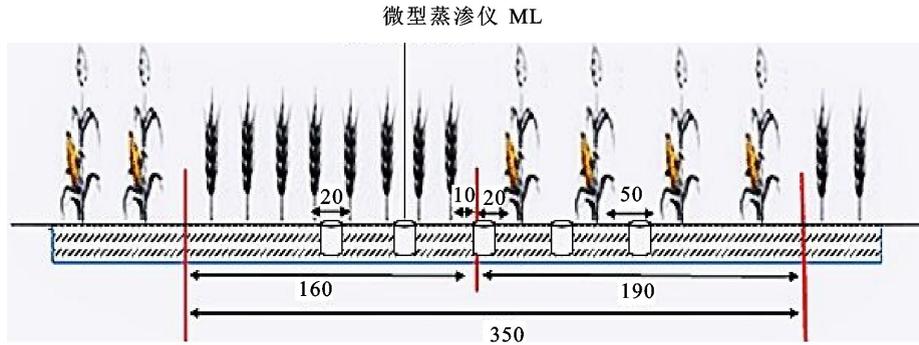


图 2 间作处理的田间示意图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of wheat/maize intercropping treatment in fields(Unit:cm)

2 结果与分析

2.1 种植模式和施氮量对作物耗水量的影响

由图 3 可知, 种植模式和施氮显著影响小麦耗水量 (ET), 但两者互作时影响不显著。在同一氮肥水平下, 小麦间作处理除越冬期外, 从返青期至收获期耗水量均显著高于单作处理 ($P < 0.05$)。其中, 在相同施氮水平下, 施肥处理下从返青期至收获期间作小麦耗水量较单作处理增加 5.90%~43.01%, 且在整个生育期内, 间作小麦总耗水量达到 402.23 mm, 较之单作处理增加 10.40%。不施氮情况下, 从返青期至收获期间作小麦耗水量较单作处理增加 9.83%~42.11%, 整个生育期内间作小麦总耗水量达到 371.69 mm, 较之单作处理增加 12.78%。同时, 在相同种植模式下, 除越冬期外, 施氮处理显著增加小麦各生育期的耗水量。单作处理下, 从返青期至收获期施氮小麦耗水量较不施氮处理增加 10.57%~18.37%, 整个生育期内施氮小麦总耗水量达到 364.33 mm, 与不施氮处理相比增加 10.56%。间作处理下, 从返青期至收获期施氮小麦耗水量较不施氮处理增加 6.29%~11.28%, 与不施氮处理相比增加 8.22%。

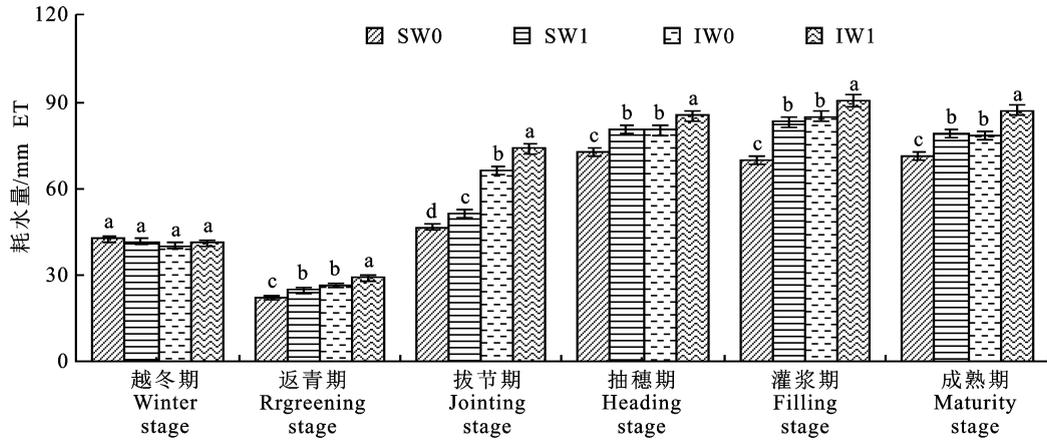
图 4 表明, 间作玉米在除大喇叭口期外, 其他生育时期阶段耗水量均显著低于单作处理。可能的原因是玉米生长前期与小麦间作处于生长劣

势, 而在大喇叭口期由于小麦的收获使得间作玉米迅速生长, 耗水量也相应增加。在同一氮肥水平下, 间作玉米较单作玉米的耗水量显著降低 5.72%, 不施氮处理下间作玉米较单作处理显著降低 6.93%。然而, 在同一种植模式下, 单作玉米在施氮情况下较不施氮处理的耗水量显著增加 6.70%, 整个生育期施氮玉米总耗水量达到 466.53 mm。间作处理下施氮玉米较不施氮玉米耗水量显著增加 5.33%。

以两种作物耗水量的加权平均数作为对照, 比较间作种植模式与单作耗水量差异, 发现小麦间作种植模式比单作种植耗水量增加 11.53%, 而间作玉米较相应单作处理显著降低 6.34%。而在同一种植模式下比较氮肥施用对耗水量的差异时, 发现氮肥施用会显著增加作物耗水量。

2.2 种植模式和施氮量对土壤水分含量的影响

由图 5-a 可知, 小麦播前各处理土壤水分差异较小, 而在收获期(图 5-b)时各处理土壤水分含量出现较大差异, 通过与图 5-b 对比发现, 单作小麦各层的土壤水分减少量低于间作处理, 且小麦间作带土壤含水量低于单作, 但在不同深度上表现不一致。0~80 cm 土层水分消耗量最大, 水分亏缺主要集中在 0~80 cm。而在同一种植模式下, 施肥比不施肥处理在收获期土壤水分含量要低, 氮肥水平对间作小麦土壤水分的影响主要集中在 20 cm 以下土层。



不同小写字母的柱值表示各处理的平均值(n=3)在P<0.05水平上差异显著,下同

Different lowercases indicate significant differences in mean water consumption (n=3) (P<0.05), the same below

图3 不同处理小麦各生育期的耗水量

Fig. 3 Water consumption at growth stage under different wheat treatments

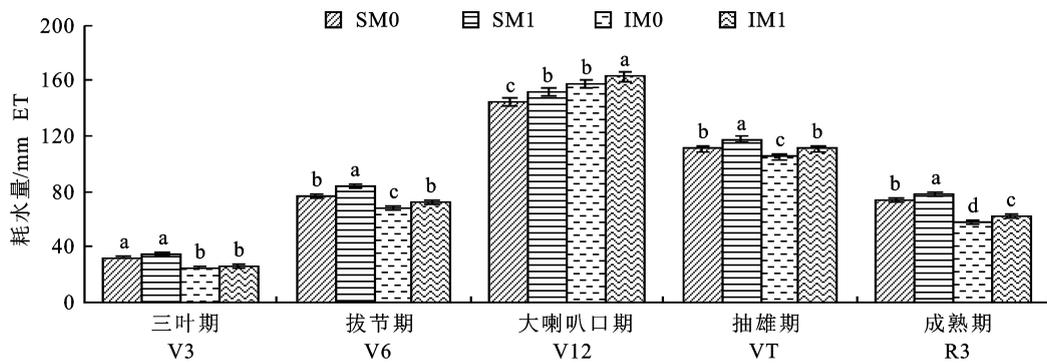


图4 不同处理玉米各生育期的耗水量

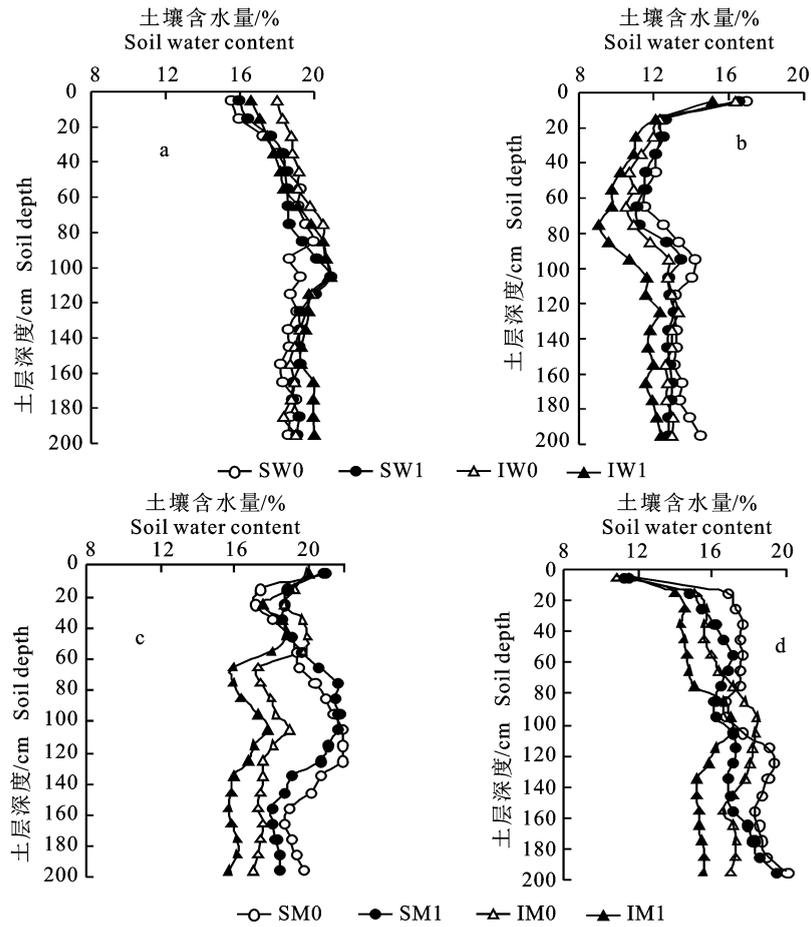
Fig. 4 Water consumption at growth stage under different maize treatments

图 5-c 表明,降水影响表层 0~20 cm 土层土壤含水量。与单作相比,间作玉米在 20~60 cm 土层含水量变化趋势差异较大,可能是间作小麦条带根系的侧向伸展所造成的差异,说明水分在共生期间具有互调余缺机制。由图 5-d 可见,玉米收获期时此段的土壤水分亏缺消失。通过比较玉米播前与收后各层土壤水分差异,发现间作玉米土壤含水量的变化量低于单作玉米,在 60~120 cm 土层水分消耗量最大,水分亏缺主要集中在 60~120 cm(说明根系吸收水分主要来源于 0~110 cm)。图 5-c 中单作玉米 0~100 cm 土层 SM1 处理高于 SM0,而图 5-d 中表现相反,SM0 各层土壤水分含量均高于 SM1,施氮处理在不同程度上比不施氮处理降低了土壤含水量。

2.3 种植模式和施氮量对土面蒸发量及其占阶段耗水量比例关系的影响

由表 2 可知,与单作小麦相比,间作小麦在施

氮时全生育期土面蒸发量(E)和土面蒸发量占耗水量的比例(E/ET)较单作分别显著增高 22.96%和 11.38%,在不施氮情况下分别显著提高 21.46%和 7.69%,造成这种差异的主要原因是小麦间作的预留行地表裸露时间长接收了较多的太阳辐射。在相同的种植模式下,单作小麦在施肥时比不施肥土面蒸发量减少 5.32%,间作小麦在施肥的情况下比不施肥土面蒸发量减少 4.14%。其中,不施氮间作小麦土面蒸发量在全生育期土面蒸发量为 130.20 mm,E/ET 高达 35.03%,均显著高于其他处理,大量的蒸发是耗水量增大的重要原因,对水分亏缺的影响不容忽视。间作小麦与单作处理在返青前土面蒸发强度差值较小,从拔节期至成熟期显著高于单作处理,且耗水量最大阶段基本上都处于灌浆期(图 3),此阶段亦是小麦间作玉米的共生期,玉米条带和小麦条带土面蒸发的差异显著,土面蒸发量远大于小麦条带。



a. 小麦播前;b. 小麦收后;c. 玉米播前;d. 玉米收后

a. Before sowing wheat;b. After harvesting wheat;c. Before sowing maize;d. After harvesting maize

图5 不同处理土壤含水量的垂直变化

Fig. 5 Vertical variation of soil moisture content under different treatments

由表3可知,间作玉米与单作种植相比较,在施氮情况下土面蒸发量和土面蒸发量占耗水量的比例分别增加14.93%和23.49%,在不施氮情况下分别增加14.18%和20.10%。在相同的种植模式下,单作玉米在施氮时比不施氮情况下全生育期土面蒸发量和土面蒸发量占耗水量的比例分别显著减少7.59%和13.38%,间作玉米在施氮时比不施氮情况下土面蒸发量和土面蒸发量占耗水量的比例分别显著减少6.98%和11.67%。玉米在小麦生长后期播种,二者共生期长58 d,小麦在间作系统中占主导地位,因此前期间作玉米条带被小麦条带遮阴而接收了相对于单作玉米更少的辐射,导致土面蒸发相对减少,主要表现在三叶期和六叶期,间作玉米土面蒸发量显著低于单作处理。随着小麦收获后地表裸露而玉米迅速增长,使得间作玉米在大喇叭口期至成熟期土面蒸

发量显著大于单作玉米。其中,不施氮间作玉米在全生育期土面蒸发量最大,达165.66 mm,土面蒸发量占耗水量的比例最高,因此,降低土壤无效蒸发是提高田间水分管理的有效措施。

与单作种植相比,小麦间作玉米全生育期土面蒸发量比单作小麦、单作玉米土面蒸发量的加权平均分别增加22.19%和14.54%。同一种植模式下,施氮处理的土面蒸发量和 E/ET 均小于不施氮处理,亦说明增施氮肥能增加土壤水分的有效性。

2.4 种植模式和施氮量对作物产量及水分利用效率的影响

由表4可知,与单作小麦相比,间作能显著提高小麦的产量和水分利用效率。在不施氮条件下,间作小麦产量比单作小麦显著提高26.97%,水分利用效率增加23.81%,而在施氮时较之单

表 2 不同处理下小麦各生育期土面蒸发量和土面蒸发量占耗水量的比例
Table 2 *E* and *E/ET* at wheat growth stage under different treatments

参数 Items	处理 Treatment	小麦各生育期 Wheat growth stages						全生育期 Whole period
		越冬期 Wintering stage	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	
降水量/mm Precipitation		38.90	16.60	8.20	92.10	6.70	23.10	185.60
<i>E</i> /mm	SW0	37.23 a	14.27 b	15.48 b	10.26 b	12.79 c	17.18 c	107.20 c
	SW1	35.40 b	13.57 b	15.48 b	9.75 b	11.12 d	16.19 d	101.50 d
	IW0	38.08 a	16.01 a	25.88 a	13.36 a	14.36 a	22.52 a	130.20 a
	IW1	37.44 a	14.90 b	25.57 a	12.43 a	13.51 b	20.96 b	124.81 b
<i>E/ET</i> /%	SW0	87.51 c	54.13 c	33.19 b	14.09 b	18.25 a	24.12 b	32.53 b
	SW1	85.28 c	46.55 d	30.02 c	12.12 c	13.40 c	20.56 c	27.86 c
	IW0	94.72 a	72.64 a	39.06 a	16.66 a	16.93 b	28.79 a	35.03 a
	IW1	90.87 b	60.32 b	34.69 b	14.59 b	14.95 c	24.08 b	31.03 b
变异来源 Source		施氮水平 Nitrogen application level						*
		种植模式 Planting pattern						**
		施氮水平×种植模式 Nitrogen application level×planting pattern						NS

注:同列中不同小写字母表示各处理的平均值($n=3$)在 $P<0.05$ 水平上差异显著。* * 表示 0.01 显著水平, * 表示 0.05 显著水平, NS 表示不显著。下同。

Note: Different lowercases with in the same columns indicate significant differences ($P<0.05$). * * and * refer to significant level at 0.01 and 0.05 respectively, and NS refer to non-significant. The same below.

表 3 不处理下玉米各生育期土面蒸发量占耗水量的比例
Table 3 *E* and *E/ET* at maize growth stage under different treatments

参数 Items	处理 Treatment	玉米各生育期 Maize growth stages					全生育期 Whole period
		三叶期 V3	拔节期 V6	大喇叭口期 V12	抽雄期 VT	成熟期 R3	
降水量/mm Precipitation		100.30	33.40	64.80	57.70	93.60	349.80
<i>E</i> /mm	SM0	22.22 a	39.74 a	31.64 c	27.55 c	23.93 c	145.09 c
	SM1	20.83 a	36.10 b	29.11 c	26.03 c	22.01 c	134.08 d
	IM0	16.30 b	27.78 c	47.37 a	38.08 a	36.12 a	165.66 a
	IM1	14.05 b	26.15 c	44.64 b	35.26 b	33.99 b	154.10 b
<i>E/ET</i> /%	SM0	69.47 a	51.95 a	21.95 d	24.92 c	32.31 c	33.18 c
	SM1	60.15 b	42.97 b	19.11 c	22.19 c	28.13 d	28.74 d
	IM0	66.94 a	40.67 b	30.12 a	36.30 a	62.95 a	40.18 a
	IM1	54.62 c	36.03 c	27.42 b	31.75 b	54.76 b	35.49 b
变异来源 Source		施氮水平 Nitrogen application level					**
		种植模式 Planting pattern					**
		施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern					NS

作产量显著提高 33.20%, 水分利用效率增加 12.15%。在相同种植模式下, 单作小麦在施氮条件下比不施氮时产量显著提高 22.98%, 水分利用效率增加 16.47%。同时, 间作小麦在施氮条件下较之不施氮时产量增加 29.01%, 水分利用效率增加 5.51%, 间作产量和水分利用效率分别达 8 199.48 kg/hm² 和 18.95 kg/(hm²·mm)。

由表 5 可知, 在同一氮肥水平下, 间作玉米与

单作的产量差异不显著, 而显著影响水分利用效率, 在施氮情况下水分利用效率提高 8.37%, 在不施氮情况下提高 10.06%。在相同种植模式下, 单作玉米在施氮条件下比不施氮时产量显著提高 17.59%, 水分利用效率显著增加 11.33%。同时, 间作玉米在施氮条件下较之不施氮时产量增加 15.63%, 水分利用效率增加 8.63%。

可见, 间作种植模式会显著提高小麦产量, 玉

米产量差异不显著,间作种植模式均在不同程度上提高小麦和玉米的水分利用效率。以两种作物产量与水分利用效率各自的加权平均数作为对照,比较间作种植模式与单作种植产量与水分利

用效率的差异,发现小麦间作种植模式比单作种植产量增加 30.41%,水分利用效率增加 17.54%,而玉米间作种植模式比单作种植产量增加 0.36%,水分利用效率增加 9.64%。

表 4 不同处理下小麦的产量与水分利用效率

Table 4 Yield and water use efficiency of wheat under different treatments

处理 Treatment	耗水量/mm ET	产量/(kg/hm ²) Yield	水分利用效率/ [kg/(hm ² ·mm)] WUE
SW0	329.56 c	5 005.76 c	14.51 d
SW1	364.33 b	6 155.85 b	16.90 c
IW0	371.69 b	6 355.85 b	17.96 b
IW1	402.23 a	8 199.48 a	18.95 a
变异来源 Source			
施氮水平 Nitrogen application level	* *	*	*
种植模式 Planting pattern	* *	* *	* *
施氮水平×种植模式 Nitrogen application level×planting pattern	NS	*	NS

表 5 不同处理下玉米的产量与水分利用效率

Table 5 Yield and water use efficiency of maize under different treatments

处理 Treatment	耗水量/mm ET	产量/(kg/hm ²) Yield	水分利用效率/ [kg/(hm ² ·mm)] WUE
SM0	437.25 b	8 039.76 b	18.36 c
SM1	466.53 a	9 454.10 a	20.44 b
IM0	412.23 c	8 141.83 b	20.39 b
IM1	434.21 b	9 414.63 a	22.15 a
变异来源 Source			
施氮水平 Nitrogen application level	* *	*	* *
种植模式 Planting pattern	* *	NS	*
施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern	NS	NS	NS

3 讨论

前人的研究发现,作物在间作种植条件下,水分利用效率比相应单作高,但水分的消耗量没有显著差异^[10-12]。与该结果不同,柴强等^[10]研究表明,间作耗水量较相应单作增大 12.7%~20.1%,在其他研究中亦表现出水分劣势^[13-14]。Morris 等^[15]在对前人研究总结后发现,间作群体全生育期耗水量较单作加权变化在-6%~7%。本研究表明,间作种植模式在不同程度上显著提高小麦和玉米的水分利用效率;同时,小麦间作种植的耗水量较单作小麦耗水量的加权平均增加 11.53%,而玉米耗水量却减少 6.34%,间作种植对水资源的消耗量与单作相比差异较小。杨忠浩等^[16]在研究春玉米氮肥-水分-产量关系时发现,春玉米生育期耗水量随氮肥施用量的增加而增加,而不同氮水平对间作体系中作物耗水量的影响等方面的报道较少。本试验结果表明在同一

种植模式下,施用氮肥增加作物全生育期的耗水量。因此,在半湿润区发展施氮处理的间作种植模式有利于创造适宜作物生长发育的土壤水分环境。

有研究表明,间作增加土面蒸发量与 E/ET 值^[6,17-18]。刘浩等^[19]在研究间作种植模式下冬小麦裸间蒸发变化规律时发现,返青前间作和单作麦田土面蒸发强度差值较小,而返青后间作的裸间蒸发强度明显高于单作。这与本试验结果一致,小麦和玉米生长初期 E/ET 最高,田间耗水以土面蒸发为主。而小麦生长后期由于预留的空带裸露,土面蒸发增大导致无效的水分消耗。玉米生长前期即间作共生期,由于小麦遮荫导致土面蒸发较小,减少土壤水分被作物利用的有效性。生长后期由于间作小麦条带地表无覆盖,土面蒸发剧烈,此时控制农田水分无效损耗非常关键。相同种植模式下不施氮处理作物发育较为缓慢,地表覆盖较少而接收更多辐射,导致土壤蒸发增

加,适当的氮肥施用能增加水分的有效性。

合理的间套作可以增产 30%~50%^[17,20],本研究中,间作处理较之单作种植分别在不施氮和施氮时小麦产量显著提高 26.97%和 33.20%,而间作种植模式下玉米产量没有显著差异。间作小麦比单作小麦分别在不施氮和施氮时产量显著提高 26.97%和 33.20%。有研究表明,氮肥通过调控间作体系的生长参数和养分参数,进而影响作物的生长^[21],间作具有通过增产而提高水分利用效率的优势。因此,提高玉米产量和水分利用是该模式在半湿润区推广的关键。叶优良等^[22]研究发现,不施氮条件下,小麦玉米间作相对于单作水分消耗量减少 4.82%~8.79%,而水分利用效率有减少趋势。在 300 kg/hm² 氮水平下,小麦玉米间作较单作水分消耗量减少 1.09%~6.96%,水分利用效率增加 10.76%~29.56%。孙建好等^[23]研究不同施氮水平对小麦/玉米间作水分效应的影响时发现,施氮肥降低间作小麦苗期的水分利用效率,灌浆期则超过单作小麦;施氮肥能大大提高了间作玉米的水分利用效率。张恩和等^[24]研究表明,在两种或两种以上作物组成的间作复合系统中,各组成作物的需水临界期存在一定差异,形成时间上的补偿效应,而且不同作物在土壤中的根系分布和对土壤水分的利用在层次上也存在差异,催生空间上的补偿效应,进而提高水分利用效率。柴强^[17]亦指出,在雨养和灌溉条件下,间套作都能提高水分利用效率。与本试验结果一致,间作群体中各组成作物通过对土壤水资源在时间上的互补利用,提高间作系统的水分利用效率。对于间作系统中水分是如何在两种作物间运移的,值得进一步探究。

4 结论

在半湿润区发展间作种植模式,较单作增加小麦除越冬期外各生育时期阶段耗水量 5.90%~43.01%,同时,在相同种植模式下,施氮处理显著增加了小麦同时期的阶段耗水量 6.29%~18.37%。而间作玉米在除大喇叭口期外,其他生育时期阶段耗水量均显著低于单作处理。小麦玉米间作耗水量与单作小麦相比,在施氮条件下显著增加 12.78%,在不施氮条件下显著增加 10.40%;而与单作玉米相比,间作处理在施氮时耗水量减少 6.93%,在不施氮条件下减少 5.72%。

与单作种植相比,小麦间作玉米全生育期土面蒸发量比单作小麦、单作玉米土面蒸发量和土面蒸发量占耗水量的比例(E/ET)都显著增高。同一种种植模式下氮肥施用降低土面蒸发和土面蒸发量占耗水量的比例。

间作种植模式较之单作种植表现出水分利用优势。氮肥施用提高产量和水分利用效率。间作使作物的水分利用效率显著提高 9.64%~23.81%。间作使小麦产量显著提高 26.97%~33.20%,但间作种植模式下与单作处理相比玉米产量差异不显著,提高玉米产量是该模式在半湿润区推广的关键。

参考文献 Reference:

- [1] BEDOUSSAC L, JOURNET E P, HAUGGAARD-NIELSEN H, *et al.* Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercroppings in organic farming. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 911-935.
- [2] GAO Y, DUAN AW, SUN J SH, *et al.* Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2008, 111(1): 65-73.
- [3] RASEDUZZAMAN M, JENSEN E S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91: 25-33.
- [4] 蔡明, 刘吉利, 杨亚亚, 等. 马铃薯燕麦间作和施氮对马铃薯干物质累积、产量及品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(3): 354-362.
CAI M, LIU J L, YANG Y Y, *et al.* Effects of nitrogen application and potato-oats intercropping on dry matter accumulation, yield and quality of potato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(3): 354-362.
- [5] REN J H, ZHANG L ZH, DUAN Y, *et al.* Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 168-176.
- [6] MA L SH, LI Y J, WU P T, *et al.* Coupling evapotranspiration partitioning with water migration to identify the water consumption characteristics of wheat and maize in an intercropping system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 108034.
- [7] FAMIGLIETTI J S. The global groundwater crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 945-948.
- [8] LI Y J, MA L SH, WU P T, *et al.* Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) /maize (*Zea mays* L.) strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2020, 248: 107656.
- [9] 黄高宝, 秦舒浩. 耕作措施对绿洲灌区冬小麦田蒸散特征

- 影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 793-799.
- HUANG G B, QIN SH H. Effects of tillage practices on winter wheat field evapotranspiration characteristics at oasis area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 793-799.
- [10] 柴 强, 杨彩虹, 陈桂平. 灌溉方式对绿洲灌区小麦间作玉米耗水特性的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 105-110.
- CHAI Q, YANG C H, CHEN G P. Effect of irrigation patterns on water consumption of wheat-corn intercropping in irrigated area in oasis [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(1): 105-110.
- [11] MAO L L, ZHANG L ZH, LI W Q, *et al.* Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. *Field Crops Research*, 2012, 138, 11-20.
- [12] 张风云, 吴普特, 赵西宁, 等. 间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1400-1406.
- ZHANG F Y, WU P T, ZHAO X N, *et al.* Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1400-1406.
- [13] THORSTED M D, OLESEN J E, WEINER J. Width of clover strips and wheat rows influence grain yield in winter wheat/white clover intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2005, 95(2): 280-290.
- [14] WANG Z K, ZHAO X N, WU P T, *et al.* Effects of water limitation on yield advantage and water use in wheat (*Triticum aestivum* L.) /maize (*Zea mays* L.) strip intercropping[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 149-159.
- [15] MORRIS R A, GARRITY D P. Resource capture and utilization in intercropping: water[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34: 303-317.
- [16] 杨忠浩, 党廷辉, 路 远, 等. 黄土塬区春玉米氮肥-水分-产量关系研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 237-240, 248.
- YANG ZH H, DANG T H, LU Y, *et al.* Study on the relationship between nitrogen fertilizer-water-yield of spring maize in the loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 237-240, 248.
- [17] 柴 强. 间套复合群体水分高效利用机理研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 11-15.
- CHAI Q. Research progress on mechanism of high efficient water utilization in intercropping system[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008, 10(4): 11-15.
- [18] 高 阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米/大豆不同间作模式下土面蒸发规律试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 44-48.
- GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, *et al.* Experimental study on soil evaporation of different intercropping patterns for maize and soybean[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 44-48.
- [19] 刘 浩, 段爱旺, 高 阳. 间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 34-38.
- LIU H, DUAN A W, GAO Y. Soil evaporation variation and estimating model from winter wheat field in intercropping patterns[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 34-38.
- [20] 黄进勇, 李新平, 孙敦立. 黄淮海平原冬小麦-春玉米-夏玉米复合种植模式生理生态效应研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 51-56.
- HUANG J Y, LI X P, SUN D L. Ecophysiological effects of multiple cropping of winter wheat-spring corn-summer corn in Huanghuaihai Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 51-56.
- [21] 王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(9): 1354-1363.
- WANG X R, ZHANG R ZH, LI SH M, *et al.* Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9): 1354-1363.
- [22] 叶优良, 李 隆, 孙建好. 小麦/玉米间作和氮肥对水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 176-182.
- YE Y L, LI L, SUN J H. Effect of wheat/maize intercropping and nitrogen fertilizer on water use[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(4): 176-182.
- [23] 孙建好, 李 隆, 张福锁, 等. 不同施氮水平对小麦/玉米间作产量和水分效应的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 345-348.
- SUN J H, LI L, ZHANG F S, *et al.* Influence of nitrogen application on yield and water effect in wheat/maize intercropping system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 345-348.
- [24] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1301-1304.
- ZHANG E H, HUANG G B. Temporal and spatial distribution characteristics of the crop root in intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1301-1304.

Effects of Wheat/Maize Strip Intercropping and Nitrogen Fertilizer on Crops Water Consumption and Water Use

LI Qianqian^{1,2}, WANG Xingyun¹, LI Menghao^{1,2}, CHEN Xiaoli^{1,2},
REN Xiaolong^{1,2} and ZHAO Xining³

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau of Minister of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract A field experiment was conducted under two nitrogen application rates to study the water consumption, soil evaporation characteristics and water use efficiency of wheat-maize strip intercropping and sole-cropping wheat and maize in the semi humid areas. The main purpose of this study is to promote the practice of strip intercropping in semi humid areas, and to explore the water consumption characteristics of crops in the intercropping system and the effect of elevated nitrogen application rates on the water use. The results showed that the intercropping increased the water consumption of wheat, soil evaporation and E/ET during the whole growth period, but decreased the water consumption of maize. Under the same cropping system, the application of nitrogen increased crop water consumption, and decreased the soil evaporation and E/ET during the entire growth period, which indicated that the application of nitrogen could appropriately increase soil water consumption. Compared with sole cropping, strip intercropping under nitrogen application increased wheat yield and water use efficiency by 33.20% and 12.15%, respectively, and wheat yield and water use efficiency increased by 26.97% and 23.81% respectively compared with sole cropping; intercropped maize and sole cropping had no significant difference in yield, but significantly increased WUE by 8.37% and 10.06% under nitrogen and non-nitrogen application, respectively. Under the same planting pattern, nitrogen application increased the yield and water use efficiency of wheat and maize at the same time. Therefore, the strip intercropping with nitrogen application can be used in semi humid areas to improve water use efficiency and achieve high yield.

Key words Intercropping; Water consumption; Soil evaporation; Water use efficiency

Received 2020-09-02

Returned 2020-09-23

Foundation item The National Natural Science Foundation of China(No. 31871562).

First author LI Qianqian, female, master student. Research area: crop cultivation. E-mail: 2640856324@qq.com

Corresponding author CHEN Xiaoli, female, doctoral supervisor, associate professor. Research area: nutrient efficient utilization and water-saving in arid areas. E-mail: cxlrxl@aliyun.com

(责任编辑:郭柏寿 Responsible editor: GUO Baishou)