

春小麦与玉米、向日葵间作套种对土壤水分的影响

艾海舰¹, 李志熙¹, 边利军²

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 乌兰布和灌域管理局 沙区灌溉试验站, 内蒙古 磴口 015200)

摘 要: 在河套灌区以春小麦、玉米、向日葵单作为对照, 测定并分析了春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种作物生长季 0—120 cm 土层土壤水分及作物产量。结果表明, 春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种生长季的土壤水分蒸散强度为双峰曲线, 春小麦、玉米、向日葵单作为单峰曲线。春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分蒸散量高于春小麦、玉米、向日葵单作。春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种提高了作物产量, 提高了土地当量比, 但降低了作物生长期、作物生长季及灌溉水的水分利用效率和水分当量比。建议河套灌区减少间作套种面积, 或间作套种时在不同作物之间修建土埂隔挡, 根据不同作物对水分的需求分别灌溉。

关键词: 小麦; 玉米; 向日葵; 间作套种; 土壤水分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0091-08

中图分类号: S344.2, S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.031

Effects of Spring Wheat/Maize, Spring Wheat/Sunflower Intercropping on Soil Moisture

AI Hai-jian¹, LI Zhi-xi¹, BIAN Li-jun²

(1. College of Life Science, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. Sandy Area Irrigation Experiment Station, Ulanbuh Irrigation Field Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: Compared with spring wheat, maize and sunflower sole cropping, soil moisture in 0—120 cm soil depth of spring wheat/maize and spring wheat/sunflower intercropping during annual crop growth periods and crops yields were determined in Hetao irrigation district, Inner Mongolia Autonomous Region. The results showed that the seasonal changes of soil moisture evapotranspiration intensity of spring wheat/maize, spring wheat/sunflower intercropping were bimodal curve, while spring wheat, maize and sunflower sole cropping were unimodal curve, and the soil moisture evapotranspiration amounts of intercropping patterns were higher than sole cropping patterns. The crop yields and land equivalent ratio of intercropping patterns were higher than sole cropping patterns, but intercropping patterns reduced soil water use efficiency and water equivalence ratio, reduced irrigation use efficiency and irrigation water equivalence ratio in crop growth periods and annual crop growth periods. In order to improve soil water use efficiency, the intercropping area should be reduced, or intercropping crops should be segregated with a bank, and crops should be irrigated respectively according to the different water requirement.

Keywords: wheat; maize; sunflower; intercropping; soil moisture

间作套种是在同一块畦田成行或成带状间隔种植两种或两种以上的作物。间作套种在时间、空间上能充分利用光能、热能, 提高作物对土壤养分的吸收利用^[1-6], 提高土壤水分利用效率^[7-17], 减轻病虫害及连作阻碍^[18-22], 提高作物产量及农田生产力^[23-26], 是我国及亚洲、非洲、拉丁美洲传统的种植方式。河套灌区是我国三大灌区之一, 具有良好的自流灌溉系

统, 光热资源丰富, 但无霜期短, 因而间作套种为该区的主要种植方式。间作套种作物水分利用效率一般以某一作物生长发育期内的土壤水分蒸散量来计算^[14, 16, 27-28], 而不以作物生长季的土壤水分蒸散量来计算, 这样就难以反映作物整个生长期的水分利用效率。目前国家已对河套灌区实行限额用水^[29], 而该区无论是单作或间作套种, 仍采用大水漫灌, 水资源

收稿日期: 2013-07-27

修回日期: 2013-08-27

资助项目: 陕西省科技厅农业攻关项目“优质猪生产与粪污资源利用示范”(2010K01-01); 国家自然科学基金项目(41171421)

作者简介: 艾海舰(1965—), 男(汉族), 陕西省米脂县人, 硕士, 副教授, 主要从事土壤资源环境研究。E-mail: ahj369@126.com。

浪费严重。本研究为了节约用水,以春小麦、玉米、向日葵单作为对照,对春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分利用效率进行测定,为河套灌区节水种植提供参考。

1 试验设计与测定方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区磴口县补隆淖尔镇,该区年均气温 7.6 °C,降雨量 142.7 mm,蒸发量 2 381.8 mm,日照时数 3 209.5 h,作物生长季(春季 3 月 16 日至秋季 10 月 6 日)光合有效辐射 1.68×10^5 J/cm²,无霜期 136~144 d。试验地土壤为灌淤土,质地为壤土,0—80 cm 土层土壤平均容重为 1.48 g/cm³[30],80—120 cm 土层平均容重为 1.52 g/cm³,地下水位在 250 cm 以下,耕层土壤田间持水率 23.23%,凋萎系数 7.48%,有机质为 10.0 g/kg,总孔隙度为 45.02%。灌溉水来源于黄河,pH 值 8.1,矿化度 0.320 g/L 左右。

1.2 试验设计及材料

2010—2012 年,每年选择 3 块面积为 0.70~0.75 hm²,土壤肥力基本一致,前茬为玉米的地块作为试验田。每块试验田被划分为 5 个小区,每个小区长 54.0 m,宽 23.0 m,面积 0.124 2 hm²,分别为春小麦单作、春小麦/向日葵间作套种、向日葵单作、春

小麦/玉米间作套种、玉米单作。试验以春小麦、向日葵、玉米单作为对照,测定春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分蒸散量及春小麦、向日葵、玉米产量。试验每年重复 3 次。

间作套种小区不同作物的种植带宽均为 1.8 m,每小区均种植 6 条春小麦带和 6 条玉米带或 6 条向日葵带。相邻小区之间留宽 1.2 m 的保护区。保护区两侧修高 40 cm,底宽 40 cm 的土埂,保证灌溉时不同小区之间水分不串流。

所有小区的灌溉方式均为漫灌,不同种植带间无土埂隔离,灌溉时漫灌所有种植带。所有小区的玉米、向日葵均采用地膜覆盖。地膜宽 70 cm。

供试春小麦为永良 4 号,每年 3 月 25 日播种。单作与间作套种的播种量均为 450.0 kg/hm²,行距为 11.0 cm。播种时施磷酸二铵 375.0 kg/hm²,氯化钾 37.5 kg/hm²;拔节期随灌水追施尿素 150.0 kg/hm²。无论是单作或间作套种,根据当地传统的灌溉制度,春小麦生长期均灌水 4 次(表 1),分别在春小麦分蘖期、拔节期、扬花期和灌浆期;与玉米间作套种的种植带在春小麦收获后于玉米抽雄吐丝期、灌浆期灌溉 2 次,与向日葵间作套种的在收获后于向日葵开花期灌溉 1 次。每次的灌水量均为 90 mm(进水口用梯形量水堰测定)。无论单作或间作套种,春小麦的除草、追肥等栽培管理措施均相同。

表 1 不同种植模式的灌水日期及灌水量

种植模式	灌溉日期						灌溉次数	每次灌水量/mm	总灌水量/mm
	0504	0524	0620	0704	0803	0830			
春小麦单作	√	√	√	√	×	×	4	90	360
春小麦/玉米间作	√	√	√	√	√	√	6	90	540
玉米单作	×	×	×	√	√	√	3	90	270
春小麦/向日葵间作	√	√	√	√	√	×	5	90	450
向日葵单作	×	×	×	√	√	×	2	90	180

注:√表示灌溉,×表示未灌溉。

供试玉米为巴单 3 号,每年 4 月 25 日播种。单作、间作套种均采用宽行密植,大行距为 80 cm,小行距为 30 cm,株距为 25 cm。每 1 种植带种植 4 行玉米,边行距春小麦带 20 cm。播种时单作及间作套种均施磷酸二铵 375.0 kg/hm²,硝酸钾 150.0 kg/hm²;喇叭口期和抽雄吐丝期分别追施尿素 75.0 和 225.0 kg/hm²。间作套种玉米共灌水 6 次,分别于玉米幼苗期、三叶期、拔节期、喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期。单作玉米共灌水 3 次,分别于玉米喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期。间作套种、单作每次的灌水量均为 90 mm,栽培管理措施相同。

供试向日葵为先瑞 9 号,每年 5 月 30 日播种。单

作及间作套种均采用宽行密植,宽行行距 80 cm,窄行行距 30 cm,株距 45 cm。单作及间作套种播种时均施磷酸二铵 375.0 kg/hm²,氯化钾 37.5 kg/hm²,显蕾期追施尿素 150.0 kg/hm²。间作套种向日葵带在播种前灌溉 2 次,分别于春小麦分蘖期和拔节期;播种后灌溉 3 次,分别在向日葵苗期、显蕾期、开花期。单作向日葵在显蕾期、开花期灌溉 2 次,单作、间作套种每次的灌溉量均为 90 mm,栽培管理措施相同。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土壤水分

(1) 春小麦单作与间作套种带:采用蛇形法在每个小区或其春小麦种植带选择 5 个测试点,每年从 3

月16日到10月6日,即作物生长季,在每月的6日、16日和26日,用土钻($\Phi=4.0\text{ cm}$)每间隔10 cm土层采样1次,烘干法测定春小麦单作、间作套种带0—120 cm土层土壤水分(%),并在春小麦播种(3月26日)及收获期(7月12日)加测1次。每个小区春小麦单作、间作套种带不同测定期的土壤水分(%)分别为该期5个测定点的平均值。

(2) 玉米、向日葵单作及玉米、向日葵间作套种带:每年的3月16到玉米种植时(4月26日)、向日葵种植时(5月30日),在每月的6,16和26日,在每个小区或其玉米、向日葵种植带,用土钻($\Phi=4.0\text{ cm}$)每间隔10 cm土层采样1次,采用烘干法测定露地0—120 cm土层土壤水分(%);玉米、向日葵播种时加测1次。玉米、向日葵种植后采用蛇形法,在每个小区或其玉米、向日葵种植带,分别在地膜覆盖区及地膜间露地各选选择5个测试点,每月的6,16,26日,直到10月6日,用土钻($\Phi=4.0\text{ cm}$)每间隔10 cm土层采样1次,烘干法测定地膜覆盖区及地膜间露地0—120 cm土层土壤水分(%),并在玉米、向日葵收获期(9月26日)加测1次。玉米、向日葵播种前单作及间作套种带不同时期的土壤水分分别为该期5个测定点的平均值。玉米、向日葵播种后单作及间作套种带不同时期的土壤水分分别为不同时期7/9地膜覆盖区的土壤水分加上2/9地膜间露地的土壤水分(地膜覆盖面积占地表面积7/9);不同小区不同时期地膜覆盖区的土壤水分、地膜间露地的土壤水分分别为该期5个测定点的平均值。

(3) 间作套种小区:每年从3月16日至10月6日,采用蛇形法在两种作物相邻区的中部选择5个测试点,每月的6,16和26日,用土钻($\Phi=4.0\text{ cm}$)每间隔10 cm土层采样1次,烘干法测定间作套种两种作物相邻区0—120 cm土层土壤水分(%),并在不同作物播种、收获期加测1次。春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种不同时期的土壤水分分别为相应时期的春小麦种植带、相邻区、玉米种植带或向日葵种植带的土壤水分平均值。

每次采样后将采样孔用土填实并进行标记,以防灌溉水进入及下次在同一点采样。根据不同土层的土壤体积质量、土层厚度和不同处理的土壤水分(%)换算出不同处理不同土层的土壤水分含量(mm),计算出不同处理0—120 cm土层土壤水分含量。

1.3.2 降水量 试验地旁设有农田小气候观测站,监测、记录作物生长期间的降水量。

1.3.3 作物生长期及作物产量 记录每一作物种植、收获的时间。

(1) 春小麦。成熟期在单作、间作套种带采用蛇形法选择5个测试区,每一测试区选取 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 的地块,测定春小麦产量。单作春小麦的产量为5个测试区的平均值,间作套种春小麦的产量为5个测试区平均值的50%。

(2) 玉米、向日葵。成熟期在单作、间作套种带采用蛇形法选择5个测试区,每一测试区选取 $1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的地块,测定向日葵、玉米产量。单作作物的产量为5个测试区的平均值,间作套种作物的产量为5个测试区平均值的50%。

1.3.4 土壤水分蒸散量及水分利用效率

(1) 土壤水分蒸散强度(E_i)。指作物某一生长阶段的土壤水分蒸散量与该段持续日数之比^[33-34](mm/d)。试验地平整,地下水位较深,土壤质地均一,不产生渗漏、地下水补给及水分的水平运动,根据水量平衡,计算作物不同生长阶段的土壤水分蒸散量及水分蒸散强度^[31-32]。

$$E_i = E_t / \Delta d, E_t = P + I \pm \Delta h$$

式中: E_t ——作物某一生长阶段的土壤水分蒸散量(mm); P ——相应阶段的降水量(mm); I ——相应阶段的灌水量(mm); Δh ——相应阶段的土壤水分含量变化值(mm); Δd ——相应阶段的持续日数(d)。

(2) 土地当量比(LER)。指同一地块中2种或2种以上作物间作套种时的产量与相应单作作物产量之比的和^[13,23,26]。

$$\text{LER} = \text{LER}_w + \text{LER}_m \text{ 或 } \text{LER}_s; \text{LER}_w = Y_{wi} / Y_{ws};$$

$$\text{LER}_m = Y_{mi} / Y_{ms}; \text{LER}_s = Y_{si} / Y_{ss}$$

式中: $\text{LER}_w, \text{LER}_m, \text{LER}_s$ ——间作套种春小麦、玉米、向日葵的偏土地当量比; Y_{wi}, Y_{mi}, Y_{si} ——春小麦、玉米、向日葵间作套种产量; Y_{ws}, Y_{ms}, Y_{ss} ——春小麦、玉米、向日葵单作产量(kg/hm^2)。LER>1,说明间作套种提高了土地的生产力;LER<1,则降低了土地的生产力。

(3) 作物生长期的水分利用效率(WUE)。作物生长期为作物播种到收获之间的持续期(本研究间作套种处理为春小麦播种到玉米或向日葵收获之间的持续期,单作处理为该作物播种到收获之间的持续期)。作物生长期的水分利用效率为作物生长期单位土壤水分蒸散量所得到的产量^[13,26] [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]。

(4) 作物生长期的水分当量比(WER)。间作套种中各作物生长期的水分利用效率(WUE)与其单作作物生长期的水分利用效率之比的和。

$$\text{WUE} = Y / E_g;$$

$$\text{WER} = \text{WER}_w + \text{WER}_m \text{ 或 } \text{WER}_s;$$

$$\text{WER}_w = \text{WUE}_{wi} / \text{WUE}_{ws};$$

$$WER_m = WUE_{mi} / WUE_{ms};$$

$$WER_s = WUE_{si} / WUE_{ss}$$

式中: Y ——作物产量 (kg/hm^{-2}); E_g ——作物生长期的土壤水分蒸散量 (mm); WER_w, WER_m, WER_s ——间作套种春小麦、玉米、向日葵生长期的偏水分当量比; $WUE_{wi}, WUE_{mi}, WUE_{si}$ ——间作套种春小麦、玉米、向日葵的水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $WUE_{ws}, WUE_{ms}, WUE_{ss}$ ——春小麦、玉米、向日葵单作生长期的水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $WER > 1$, 间作或套种提高了土壤水分利用效率; $WER < 1$, 则降低了土壤水分利用效率。

(5) 作物生长季的水分利用效率 (AWUE)。内蒙古河套灌区为温带大陆性气候, 为喜凉作物生长区, 该区作物生长季为春季日平均气温稳定通过 3°C 时 (3月16日) 到秋季日平均气温下降到 3°C 以下时 (10月6日) 之间的持续期。作物生长季的水分利用效率为作物生长季单位土壤水分蒸散量所得到的产量 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$].

(6) 作物生长季的水分当量比 (AWER)。间作套种各作物生长季的水分利用效率与其相应单作作物生长季的水分利用效率之比的和。

$$AWUE = Y/E; \quad AWER = AWER_w + AWER_m \text{ 或 } AWER_s;$$

$$AWER_w = AWUE_{wi} / AWUE_{ws};$$

$$AWER_m = AWUE_{mi} / AWUE_{ms};$$

$$AWER_s = AWUE_{si} / AWUE_{ss}$$

式中: E ——作物生长季的土壤水分蒸散量 (mm); $AWER_w, AWER_m, AWER_s$ ——间作套种春小麦、玉米、向日葵生长季的偏水分当量比; $AWUE_{wi}, AWUE_{mi}, AWUE_{si}$ ——春小麦、玉米、向日葵间作套种生长季的水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $AWUE_{ws}, AWUE_{ms}, AWUE_{ss}$ ——春小麦、玉米、向日葵单作生长季的水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $AWER > 1$, 表明间作套种提高了作物生长季的土壤水分利用效率; $AWER < 1$, 则降低了作物生长季的土壤水分利用效率。

(7) 灌溉水分利用效率 (IWUE)。作物生长季单位灌水量所得到的作物产量 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$].

(8) 灌溉水分当量比 (IWER)。间作套种各作物的灌溉水分利用效率与其单作作物的灌溉水分利用效率之比的和。

$$IWUE = Y/I_a; \quad IWER = IWER_w + IWER_m \text{ 或 } IWER_s;$$

$$IWER_w = IWUE_{wi} / IWUE_{ws};$$

$$IWER_m = IWUE_{mi} / IWUE_{ms}; \quad IWER_s = IWUE_{si} / IWUE_{ss}$$

式中: I_a ——作物生长季的灌水量 (mm); $IWER_w, IWER_m, IWER_s$ ——间作套种春小麦、玉米、向日葵生

长季的偏灌溉水分当量比; $IWUE_{wi}, IWUE_{mi}, IWUE_{si}$ ——春小麦、玉米、向日葵间作套种灌溉水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $IWUE_{ws}, IWUE_{ms}, IWUE_{ss}$ ——春小麦、玉米、向日葵单作的灌溉水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$]; $IWER > 1$, 间作套种提高了灌溉水分利用效率; $IWER < 1$, 表明则降低了灌溉水分利用效率。

1.4 数据处理

将不同处理的不同小区、不同时期 3 a 的试验数据进行平均, 作为不同处理不同时期的试验数据。不同处理不同时期的试验数据采用 Excel 制作图表, 用 SPSS 10.0 软件进行单因素方差分析; 如果差异显著, 则采用邓肯氏新复极差检验法进行多重比较, 检验不同处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤水分蒸散强度

从土壤冻融到土壤冻结, 即作物生长季, 单作作物的土壤水分蒸散强度均为单峰曲线, 间作套种的为双峰曲线 (图 1)。单作作物中, 春小麦的最高土壤水分蒸散强度为 $7.97 \text{ mm}/\text{d}$, 玉米为 $7.29 \text{ mm}/\text{d}$, 向日葵为 $6.07 \text{ mm}/\text{d}$ 。间作套种的土壤水分蒸散强度第 1 峰值均低于春小麦单作, 第 2 峰值均低于玉米单作或向日葵单作; 间作套种的第 1 峰值与春小麦单作同步, 第 2 峰值与相应的玉米单作或向日葵单作同步。春小麦/向日葵间作套种的 2 个峰值均低于春小麦/玉米间作套种, 且第 2 峰值延迟约 10 d。

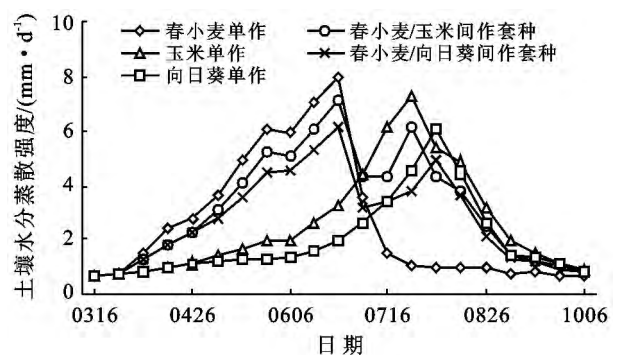


图 1 作物生长季不同处理的土壤水分蒸散强度

2.2 作物生长期及土壤水分蒸散量

不同处理中, 春小麦单作的生长期为 109 d, 玉米单作为 154 d; 向日葵单作为 120 d; 春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种均为 185 d; 作物生长季为 205 d。春小麦/玉米间作套种的共生期为 78 d, 春小麦/向日葵为 44 d (表 2)。

在作物生长季,即3月16日至10月6日,向日葵单作播种前76 d为裸地,土壤水分蒸散量高达76.03 mm;玉米单作播种前41 d为裸地,土壤水分蒸散量为32.78 mm;春小麦单作播种前10 d为裸地,土壤水分蒸散量仅为2.24 mm,与间作套种相同。作物生长期春小麦/玉米间作套种的土壤水分蒸散量最高,为666.70 mm,向日葵单作最低,为330.11 mm(表2)。在作物生长季,春小麦收获后86 d为裸地,土壤水分蒸散量高达72.54 mm;玉米单作、向日葵单作收获后10 d为裸地,土壤水分蒸散量分别为2.76和2.67 mm,与间作套种处于同一水平。作物生长季的土壤水分蒸散量为生长季作物播种前、作物生长期

及作物收获后的土壤水分蒸散量之和,其中春小麦/玉米间作套种的最高,其次为春小麦/向日葵间作套种,向日葵单作最低(表2)。

2.3 作物产量及土地当量比

间作套种作物的偏土地当量比均 >0.5 ,土地当量比均大于1.20,说明间作套种均可显著提高作物产量,提高土地生产力。春小麦/向日葵间作套种的土地当量比略高于春小麦/玉米间作套种(表3),说明春小麦/向日葵间作套种的增产程度高于春小麦/玉米间作套种,这可能与春小麦/向日葵套种的共生期短,2种作物对水、肥吸收利用及通风透光等方面的竞争期短有关。

表2 不同种植模式的作物生长期及土壤水分蒸散量

种植模式	生长季	生长期	共同生长期	生长期降水量/mm	生长季降水量/mm	土壤水分蒸散量/mm			
						播种前	生长期	收获后	生长季
春小麦单作	0316—1006	0326—0712		59.1	102.7	2.24cC	478.32cC	72.54aA	553.10cBC
春小麦/玉米间作套种	0316—1006	0326—0926	0426—0712	102.7	102.7	2.24cC	666.70aA	2.49bB	671.43aA
玉米单作	0316—1006	0426—0926		101.2	102.7	32.78bB	497.15cC	2.76bB	532.69cC
春小麦/向日葵间作套种	0316—1006	0326—0926	0530—0712	102.7	102.7	2.24cC	582.04bB	2.41bB	586.69bB
向日葵单作	0316—1006	0530—0926		69.6	102.7	76.03aA	330.11dD	2.67bB	408.81dD

注:表中同列数据后的小、大写字母分别表示差异达显著($p<0.05$)和极显著($p<0.01$)水平。

表3 不同种植模式下的作物产量和土地当量比

种植模式	作物产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			土地当量比			
	小麦	玉米	向日葵	LER_w	LER_m	LER_s	LER
春小麦单作	6 273.15						
春小麦/玉米间作	3 554.56	6 886.94		0.566 6	0.652 8		1.219 4
玉米单作		10 549.62					
春小麦/向日葵间作	3 658.32		3 186.42	0.583 2		0.664 2	1.247 4
向日葵单作			4 946.50				

注:LER为土地当量比; LER_w , LER_m , LER_s 分别为春小麦、玉米和向日葵的偏土地当量比。

2.4 作物生长期的水分利用效率及水分当量比

间作套种作物生长期的偏水分当量比均 <0.5 ,水分当量比均小于1.0(表4),说明间作套种降低了作物生长期的水分利用效率,这主要是间作套种不同

作物种植带间无土埂阻挡,浇灌某一作物时同时漫灌了另一作物种植带,而另一作物种植带没有播种或作物已被收获,或不是作物水分最佳需求期,故水分利用效率大为降低。

表4 不同种植模式下作物生长期农田土壤水分蒸散量、水分利用效率和水分当量比

种植模式	生长期的水分蒸散量/mm	生长期的水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)			生长期的水分当量比			
		春小麦	玉米	向日葵	WER_w	WER_m	WER_s	WER
春小麦单作	478.32	13.11						
春小麦/玉米间作套种	666.70	5.33	10.33		0.406 6	0.486 8		0.893 4
玉米单作	497.15		21.22					
春小麦/向日葵间作套种	582.04	6.29		5.47	0.479 8		0.365 2	0.845 0
向日葵单作	330.11			14.98				

2.5 作物生长季的水分利用效率及水分当量比

表5为不同种植模式作物生长季的土壤水分蒸

散量、水分利用效率和水分当量比。由表5可知,春小麦/玉米间作套种春小麦生长季的偏水分当量比为

0.466 5, 玉米为 0.518 2, 间作套种的水分当量比为 0.984 7, 说明春小麦/玉米间作套种提高了玉米生长季的水分利用效率, 降低了春小麦及间作套种作物的水分利用效率, 但差异不显著。春小麦/向日葵间作套种中, 春小麦的偏水分当量比为 0.550 3, 说明春小

麦/向日葵间作套种可提高春小麦生长季的水分利用效率, 但向日葵生长季偏水分当量比仅为 0.448 8, 降低了向日葵生长季的水分利用效率。春小麦/向日葵间作套种作物生长季的水分当量比为 0.999 1, 较单作作物仍有一定程度的降低, 但影响不显著(表 5)。

表 5 不同种植模式作物生长季的土壤水分蒸散量、水分利用效率和水分当量比

种植模式	生长季的水分蒸散量/mm	生长季的水分利用效率/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)			作物生长季的水分当量比			
		小麦	玉米	向日葵	AWER _w	AWER _m	AWER _s	AWER
春小麦单作	553.10	11.34						
春小麦/玉米间作套种	671.43	5.29	10.26		0.466 5	0.518 2		0.984 7
玉米单作	532.69		19.80					
春小麦/向日葵间作套种	586.69	6.24		5.43	0.550 3		0.448 8	0.999 1
向日葵单作	408.81			12.10				

春小麦单作、玉米单作、向日葵单作生长季的水分利用效率均显著低于生长期的水分利用效率(表 4—5), 主要是生长季的土壤水分蒸散量除生长期的土壤水分蒸散量外, 还包含了作物播种前及收获后裸地的土壤水分蒸散量。

间作套种生长季的水分利用效率略低于生长期的水分利用效率, 但间作套种生长季水分当量比显著

高于生长期的水分当量比, 主要是单作生长季的水分利用效率较生长期的显著降低, 而间作套种则略微降低造成的。

2.6 灌溉水分利用效率及灌溉水分当量比

由表 6 可知, 间作套种作物的偏灌溉水分当量比均 < 0.5, 灌溉水分当量比均 < 1.0, 说明间作套种降低了灌溉水分的利用效率。

表 6 不同种植模式作物生长期的灌溉水分利用效率和灌溉水分当量比

种植模式	作物生长期的灌溉量/mm	灌溉水分利用效率/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)			作物生长期的灌溉水分当量比			
		春小麦	玉米	向日葵	IWER _w	IWER _m	IWER _s	IWER
春小麦单作	360	17.43						
春小麦/玉米间作套种	540	6.58	12.75		0.377 8	0.326 3		0.704 1
玉米单作	270		39.07					
春小麦/向日葵间作套种	450	8.13		7.08	0.466 6		0.257 6	0.724 2
向日葵单作	180			27.48				

3 结果讨论

单作作物的土壤水分蒸散强度为单峰曲线, 间作套种的为双峰曲线, 这与戴佳信等、朱敏等^[33-34]的试验结果一致。虽然春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分蒸散强度均低于其相应单作作物, 但由于间作套种作物的生长期长, 灌溉次数多及总灌水量大, 因而其土壤水分蒸散量大。间作套种作物在时间、空间上能充分利用光能、热能, 减轻病虫害, 利于作物对土壤水分、养分的吸收, 使得作物产量及土地当量比显著提高。间作套种不同作物种植带之间无土埂, 每次漫灌所有种植带, 但每次灌溉仅能满足一种作物对水分的需求, 而另一种种植带没有播种或作物已收获, 或不是作物水分最佳需求期, 造成另一作物需水期与供水期错位, 造成水分无效损耗增大, 故作物生长期、作物生长季及灌溉水的利用效率和水分当

量比降低。前人^[13,15,26,35]的试验结果表明间作套种可提高水分利用效率, 主要是前人的两种作物多为同一时期播种且同一时期收获, 2 种作物的生长期与共生期相同, 与单作作物的灌水量、降水量相同, 而本试验春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的作物生长期为 185 d, 共生期分别为 78 和 44 d, 灌水次数、灌水总量比单作多, 且有大量的灌水在另一作物种植前或收获后进行; 其次前人^[13,15,27-28]在计算间作套种作物水分利用效率均以某一作物生长发育期内的土壤水分蒸散量来计算, 而不是以 2 种或多种作物的生长期、作物生长季的土壤水分蒸散量来计算, 土壤水分蒸散量不包含作物播种前或收获后裸地所蒸散的土壤水分。杨彩虹等^[17]、柴强等^[12]对小麦、玉米种植带分别灌溉, 不同种植带的灌水量及灌溉次数分别与其相应单作作物一致, 且以小麦、玉米各自的生长发育期土壤水分蒸散量来计算, 故小麦/玉米间作套种提

高了土壤水分利用效率较高。河套灌区春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种,灌溉时漫灌不同作物的种植带,且间作套种作物的灌水次数、灌水量远多于单作作物,导致其土壤水分利用效率降低。

4 结论

(1) 春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分蒸散强度为双峰曲线,春小麦、玉米、向日葵单作为单峰曲线。春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种的土壤水分蒸散量高于春小麦、玉米、向日葵单作。

(2) 春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种提高了作物产量,提高了土地当量比,但降低了作物生长期、生长季及灌溉水的水分利用效率及水分当量比。

(3) 春小麦/玉米、春小麦/向日葵间作套种降低了水分利用效率,主要是间作套种的作物需水特性不同,而灌溉时则漫灌不同作物种植带,造成作物供水期与需水期错位,不能充分利用土壤水分。

(4) 建议河套灌区减少间作套种作物面积或间作套种时不同作物种植带间应建土埂隔挡,并根据不同作物对水分的需求分别灌溉。

[参 考 文 献]

- [1] Li Long, Sun Jianhao, Zhang Fusuo, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping (I): Yield advantage and interspecific interaction on nutrients [J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123-137.
- [2] Gaiser T, De Barros I, Lange F M, et al. Water use efficiency of a maize/cowpea intercrop on a highly acidic tropical soil as affected by liming and fertilizer application [J]. *Plant and Soil*, 2004, 263(1): 165-171.
- [3] 左元梅,张福锁. 不同间作组合和间作方式对花生铁营养状况的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(3): 300-306.
- [4] 唐劲驰, Ismael A M, 余丽娜, 等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1196-1203.
- [5] 褚贵新, 沈其荣, 曹金留, 等. 旱作水稻与花生间作系统中的氮素固定与转移及其对土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 717-723.
- [6] 肖焱波, 段宗颜, 金航, 等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 267-271.
- [7] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water [J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(3/4): 303-317.
- [8] Saren B K, Jana P K. Effect of irrigation and intercropping system on yield, water-use, concentration and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in maize (*Zea mays*) and groundnut (*Arachis hypogaea*) grown as sole and intercrop [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1999, 69(5): 317-320.
- [9] Venkateswarlu S, Subramanian V B. Productivity of some rainfed crops in sole and intercrop systems [J]. *Indian Journal of Agricultural Science*, 1990, 60(2): 106-109.
- [10] Walker S, Ogindo H O. The water budget of rainfed maize and bean intercrop [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(20/27): 919-926.
- [11] Samuel G K A, Harry O L, Thierry B. Pattern of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse condition [J]. *Plant Soil*, 2001, 235(1): 85-94.
- [12] 柴强, 杨彩红, 黄高宝. 交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J]. *作物学报*, 2011, 9(1): 1623-1630.
- [13] 黄伟, 张俊花, 李文红, 等. 冀西北坝上半干旱区南瓜油菜间作的水分效应[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 4072-4081.
- [14] 高阳, 段爱旺, 刘浩, 等. 冬小麦、春玉米间作条件下作物需水规律[J]. *节水灌溉*, 2007(3): 18-21, 25.
- [15] 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.
- [16] 柴强, 杨彩红, 黄高宝. 干旱区绿洲不同种植模式作物的耗水特征[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1153-1159.
- [17] 杨彩红, 柴强, 黄高宝. 荒漠绿洲区交替灌溉小麦/玉米间作水分利用特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 782-786.
- [18] 吴凤芝, 周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 899-906.
- [19] 乔鹏, 汤利, 郑毅, 等. 不同抗性小麦品种与蚕豆间作条件下的养分吸收与白粉病发生特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1086-1093.
- [20] 田耀加, 梁广文, 曾玲, 等. 间作对甜玉米田主要害虫与天敌动态的影响[J]. *植物保护学报*, 2012, 3(1): 1-6.
- [21] 周海波, 陈巨莲, 程登发, 等. 小麦间作豌豆对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响[J]. *昆虫学报*, 2009, 52(7): 775-782.
- [22] 苏世鸣, 任丽轩, 霍振华, 等. 西瓜与旱作水稻间作改善西瓜连作障碍及对土壤微生物区系的影响[J]. *中国农业科学* 2008, 41(3): 704-712.
- [23] 沈其荣, 褚贵新, 曹金留, 等. 从氮素营养的角度分析旱作水稻与花生间作系统的产量优势[J]. *中国农业科学* 2004, 37(8): 1177-1182.
- [24] Baumann D T, Bastiaans L, Goudriaan J, et al. Analysing crop yield and plant quality in an intercropping

- system using an eco-physiological model for interplant competition [J]. *Agricultural Systems*, 2002, 73(2): 173-203.
- [25] Zhang Lizhen, van der Werf Wopke, Zhang Siping, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2007, 103(3): 178-188.
- [26] 董宛麟, 张立祯, 于洋, 等. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 127-133.
- [27] 周绍松, 李永梅, 周敏, 等. 小麦、大麦与蚕豆间作对耗水量和水分利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(3): 602-607.
- [28] 魏镇泽, 柴强, 黄鹏, 等. 玉米间作豌豆水分利用效率对供水水平和种植密度的响应[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(8): 135-138.
- [29] 白岗栓, 张蕊, 耿桂俊, 等. 河套灌区农业节水技术集成研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 149-154.
- [30] 杜社妮, 于健, 耿桂俊, 等. 定植孔密封方式对土壤水盐及番茄苗存活率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 110-116.
- [31] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 72-79.
- [32] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 施用方式对土壤水分及玉米生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 30-35.
- [33] 戴佳信, 史海滨, 田德龙, 等. 河套灌区套种粮油作物耗水规律的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 49-53.
- [34] 朱敏, 史海滨, 程满金, 等. 河套灌区小麦套种向日葵田间灌水有效性评价[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 1-4, 8.
- [35] 张莹, 孙占祥, 李爽, 等. 辽西半干旱区玉米/大豆单作田间耗水规律研究[J]. 2010, 28(5): 43-46.

(上接第 90 页)

- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [4] Högberg P, Fan Houbao, Quist M, et al. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 489-499.
- [5] Hurd T, Brach A, Raynal D. Response of understory vegetation of Adirondack forests to nitrogen additions [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(6): 799-807.
- [6] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [7] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [8] Houlton B Z, Wang Yingping, Vitousek P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 327-330.
- [9] Lu Xiankai, Mo Jiangming, Gilliam F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [10] Lu Xiankai, Mo Jiangming, Gilliam F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in tropical forests of contrasting disturbance regimes in Southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2228-2235.
- [11] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. *林业资源管理*, 2010, 1(1): 1-8.
- [12] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 等. 氮沉降下杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林凋落叶分解过程中 C, N 元素动态变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2546-2553.
- [13] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.