

小麦/向日葵间作群体水盐运移机理及种间竞争能力研究

张作为^{1,2} 史海滨¹ 刘德平² 李仙岳¹ 闫建文¹ 李宏宇³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 3. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为量化分析河套灌区小麦/向日葵间作群体两作物间相互利用水量、盐分运移机理, 明确两作物间种间相对竞争能力, 采用根系分隔技术进行试验。研究表明: 小麦/向日葵间作群体生育期内小麦条带利用向日葵侧水量为 $78.23 \sim 94.23 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 向日葵条带利用小麦侧水量为 $44.96 \sim 57.97 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 其中根系在土壤空间的交叉叠加效应可以多利用 $18.56 \sim 42.84 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 小麦带土壤水量, $20.79 \sim 46.63 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 向日葵带土壤水量, 降低 $1.32\% \sim 4.64\%$ 小麦条带土壤 EC 均值, $2.26\% \sim 3.16\%$ 向日葵条带土壤 EC 均值。水分养分互补效应可以多利用 $15.12 \sim 26.40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 小麦带土壤水量, $47.60 \sim 57.44 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 向日葵带土壤水量, 降低 $2.98\% \sim 4.69\%$ 小麦条带土壤 EC 均值, $1.82\% \sim 2.44\%$ 向日葵条带土壤 EC 均值。种间相对竞争能力上, 间作群体内小麦的竞争能力强于向日葵, 限制间作群体根系的交叉叠加及水分养分互补效应有利于提升向日葵的种间相对竞争能力。

关键词: 间作群体; 隔根; 相互利用水量; 土壤 EC 均值; 间作优势; 种间相对竞争能力

中图分类号: S344.2; S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0243-09

Water and Salt Migration Mechanism and Competitive Ability in Wheat – Sunflower Intercropping System

ZHANG Zuwei^{1,2} SHI Haibin¹ LIU Deping² LI Xianyue¹ YAN Jianwen¹ LI Hongyu³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the issues on the mutual use of water and the mechanism of salt migration, clear the relative competitive between the two species of intercropping in wheat – sunflower intercropping system in Hetao irrigation area, the experiment was conducted based on root separation method. The results showed that in wheat – sunflower intercropping system, the wheat utilized $78.23 \sim 94.23 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ of water by the side of sunflower. Meanwhile, the sunflower utilized $44.96 \sim 57.97 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ of water by the side of wheat. By the cross superposition effect of soil internal space, more soil water of $18.56 \sim 42.84 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and $20.79 \sim 46.63 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ in wheat and sunflower belts may be utilized, the mean value of root soil EC in wheat and sunflower belts could be reduced by $1.32\% \sim 4.64\%$ and $2.26\% \sim 3.16\%$, respectively. By the water and nutrient complementarity effect of soil internal space, more soil water of $15.12 \sim 26.40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and $47.60 \sim 57.44 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ in wheat and sunflower belts may be utilized, the mean value of root soil EC in wheat and sunflower belts could be reduced by $2.98\% \sim 4.69\%$ and $1.82\% \sim 2.44\%$, respectively. For the relative competitive ability between the two species in intercropping system, the wheat was stronger than sunflower, limiting the cross superposition effect and water and nutrient complementarity effect of root in intercropping system was conducive to upgrading the relative competitive ability between the two species of sunflower.

Key words: intercropping system; root separation; mutual use of water; mean value of soil EC; intercropping advantages; relative aggressivity of species

收稿日期: 2017-07-24 修回日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005, 51269015)、黑龙江省博士后资助经费项目(LBH-Z17033)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B03)

作者简介: 张作为(1985—), 男, 讲师, 东北农业大学博士后, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: zhang_zuwei6@163.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

0 引言

间作是通过不同作物在时间和空间上的合理搭配,实现种植集约化的一种种植方式。间作具有提高光能、水分、养分等农业资源利用效率^[1-3],提升单位土地面积产出数量,确保国家粮食安全的重要作用^[4-6]。河套灌区地处内蒙古光热资源丰富的中西部,又是小麦/向日葵间作模式的主要种植地区之一,但人们对增产机理认识不清,往往都认为是间作模式改善了作物的通风透光条件,从而增加了作物产量^[7-8],产生这种现象主要是因为缺乏对间作群体内部水盐运移机理及种间竞争能力的了解而引起的认识局限。

目前对间作系统地下部分的研究主要集中在间作群体的水分利用特征^[9-11]、根系分布特征^[12-13]、相对贡献率^[14-16]等方面,对间作系统内部的种间竞争能力问题研究较少^[17-18],对间作体系内部两作物间水盐运移关系的量化分析更是鲜有报道^[19]。大量研究表明,间作群体根系在时空上的错位分布是间作系统高产的基础^[20-22],即间作群体的地下部优势主要来源于群体内两作物间根系的交叉叠加与水分养分互补效应,但目前仍无法对其进行量化分析。此外,向日葵是当地最常见的抗盐作物,但河套灌区长时间大范围的种植不利于土壤微生物环境的改善及土壤有机质含量的提升,易造成土壤板结退化,且长时间单一化种植还会造成向日葵列当病的高发病率。因此,间作是河套灌区可持续发展的必然选择,而量化间作群体内部水盐运移关系对于探讨河套灌区小麦/向日葵间作种植模式的可持续发展具有十分重大的意义。

为此,本文通过2 a田间小区试验,以小麦间作向日葵为研究对象,利用根系分隔理论,对河套灌区小麦/向日葵间作群体根系在土壤中的交叉叠加效应和水分与养分的传输互补效应可降低的土壤盐分及可多利用的水量进行量化分析,并对群体内的种间相对竞争能力进行研究,以期对盐渍化地区小麦/向日葵间作群体的高产高效栽培技术提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2015—2016年在内蒙古河套灌区磴口县坝楞村农业综合节水示范区(40°24'32"N, 107°02'19"E)进行。试验区海拔高度为1 048.7 m,年均气温7.6℃,年均降雨量144.5 mm,蒸发量2 343.2 mm,无霜期178 d,属中温带大陆性季风气候。

试验区前茬为玉米,土壤质地为粉砂质粘壤土(0.05~2 mm占34.532%,0.002~0.05 mm占63.267%,小于0.002 mm占2.201%),土层厚度达100 cm以上,体积质量为1.49 g/cm³,田间持水量为37.8%(体积含水率/环刀法)。耕层土壤有机质质量分数为1.14%,碱解氮质量分数0.017%,速效磷质量分数0.002%,速效钾质量分数0.016%。试验田可溶性盐主要为氯化物-硫酸盐。

1.2 试验设计

试验共设5个处理,每个处理3次重复,试验设计见表1。小区间随机区组排列。供试小麦为当地常见品种永良4号,单作与间作小麦播种密度均为450万粒/hm²,行距为12.5 cm,每条带播种6行。供试向日葵为T9938,单作与间作向日葵播种密度均为5.5万株/hm²,行距为40 cm,株距为45 cm,每条带播种1膜2行。间作各小区每种作物播种2个条带。

表1 不同处理试验设计

Tab.1 Design of different treatments

处理	种植模式	分隔方式
T1	单作小麦	根系不分隔
T2	单作向日葵	根系不分隔
T3	小麦/向日葵间作	根系不分隔
T4	小麦/向日葵间作	尼龙网隔根
T5	小麦/向日葵间作	塑料布隔根

间作群体分别设置塑料布隔根、尼龙网隔根与不隔根3种分隔方式,塑料布隔根目的是隔断小麦、向日葵间水分与养分的交流及其根系间的相互交叉叠加,尼龙网隔根目的是阻断小麦、向日葵间根系的相互交叉叠加,但不阻断两作物间水分与养分的相互传输,不隔根与单作则作为对照处理。塑料布采用0.12 mm厚农用棚膜,尼龙网采用孔径为300目、1 m宽的尼龙网,分隔深度为1 m,均铺设在距玉米20 cm、距小麦10 cm处,具体布置如图1所示。小区四周修筑30 cm高、50 cm宽的畦埂以便于灌水,畦埂内部埋入1.3 m深的防水塑料膜以防止小区内水分外渗。2015年小麦于3月21日播种,4月5日出苗,7月16日收获,向日葵于5月23日播种,5月29日出苗,9月15日收获,两作物共生期为48 d;2016年小麦于3月19日播种,4月4日出苗,7月16日收获,向日葵于5月20日播种,5月26日出苗,9月15日收获,两作物共生期为51 d。小麦施纯N 225 kg/hm²,45%作基肥,55%头水前追施,施纯P₂O₅ 150 kg/hm²,全作基肥;向日葵施纯N 200 kg/hm²,40%作基肥,60%开花期一次性追施,施纯P₂O₅ 150 kg/hm²,全作基肥。

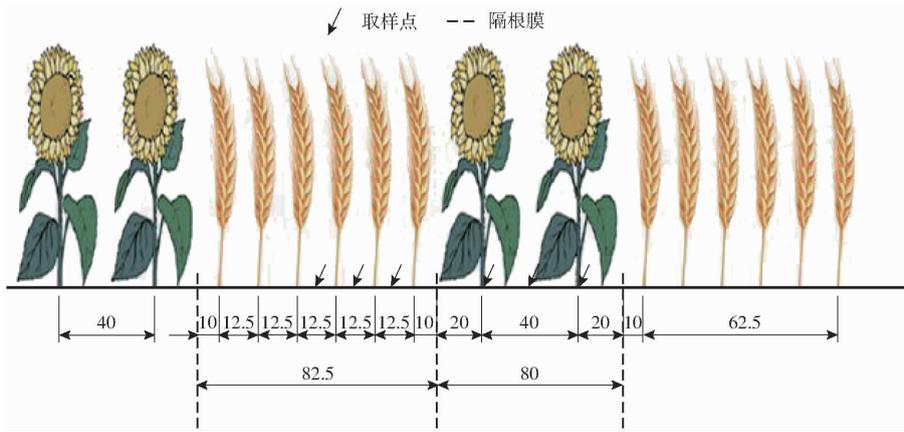


图1 小麦/向日葵间作体系中作物田间分布及根系分隔示意图

Fig. 1 Location of intercropped crops and root barrier in wheat/maize intercropping system of field

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气象资料

田间气象资料来源于安置在田间的微型气象站(HOBO型,美国),测定时间间隔为1h,可以测定田间的降雨量、温度、风速、太阳辐射等气象资料。间作群体全生育期的降雨量、灌水量及灌水时间见图2。

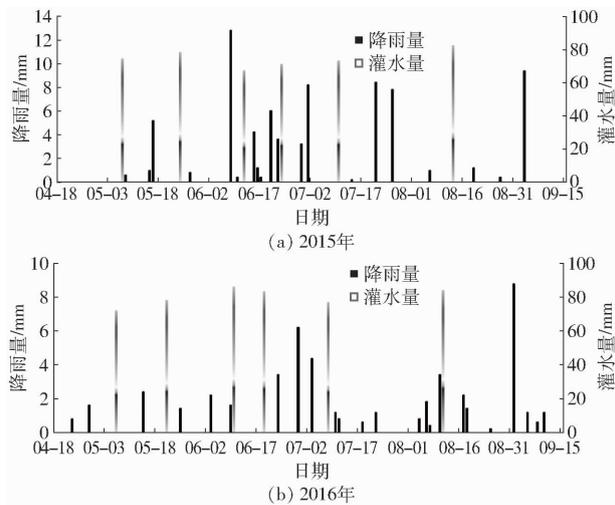


图2 作物全生育期内降雨量与灌水量

Fig. 2 Rainfall and irrigation amount during whole period of crop growth

1.3.2 土壤含水率

土壤含水率测量的取样深度为0~100cm,每20cm一层,每点5个样,采用土钻取土,干燥称量法测定,从播种开始直到全部收获,取样间隔每10d一次,灌水及降雨前后加测。每作物条带3个取样点,取样位置如图1箭头处,3次重复,合计每间作处理下的每种作物一次取样45个。

1.3.3 灌水量

各处理全生育期灌溉6次,灌水量上限为土壤田间持水量,为精确模拟实地环境,灌水量下线定为当地当次灌水时田间含水率。因此,当次灌水量则由灌前取土测含水率与田间持水量差值计算得出,

水量由带水表的水泵精确控制,灌溉水来源于黄河水。

1.3.4 土壤盐分

于小麦与向日葵播种前及收获后,采用土钻取样法分5层,每层20cm,采集0~100cm土层土样,取样位置同含水率取样位置,经实验室自然风干、研磨并过20目筛后,称取20g土样,100mL去离子水,放入烧杯用玻璃棒搅匀静置1h后,取上层澄清液用电导率仪(DDS-308A型)测定土壤浸提液电导率。

1.3.5 相互利用水量

由于根系分隔会导致间作群体根系的再分布问题,因此间作模式下不隔根处理与隔根处理下的两作物间相互利用水量需分别计算,其计算方法如下:

(1)通过对比不隔根处理两作物条带灌溉前的体积含水率与相应单作处理作物条带体积含水率差值数据,即可计算出不隔根处理单位面积间作群体整个生育期内两作物间每次灌溉后相互利用水量及总利用水量,则不隔根处理每次灌溉后利用小麦侧水量为

$$W_{bw} = 100(T_{3s} - T_2)hs\mu \quad (1)$$

式中 W_{bw} ——不隔根处理利用小麦侧水量, m^3/hm^2
 T_{3s} ——不隔根处理向日葵条带每次灌溉前的土壤体积含水率, %
 T_2 ——单作向日葵同一时间的土壤体积含水率, %
 h ——土层厚度, m
 s ——单位面积, m^2/hm^2
 μ ——间作群体中向日葵占地面积百分比, %

同理,不隔根处理每次灌溉后利用向日葵侧水量为

$$W_{bs} = 100(T_{3w} - T_1)hs\eta \quad (2)$$

式中 W_{bs} ——不隔根处理利用向日葵侧水量, m^3/hm^2

T_{3w} ——不隔根处理小麦条带每次灌溉前的土壤体积含水率, %

T_1 ——单作小麦同一时间的土壤体积含水率, %

η ——间作群体中小麦占地面积百分比, %

(2) 通过对比尼龙网隔根处理两作物条带灌溉前的体积含水率与相应塑料布隔根处理的相同作物条带体积含水率差值数据, 即可计算出尼龙网隔根处理单位面积间作群体整个生育期内两作物间每次灌溉后相互利用水量及总利用水量, 则尼龙网隔根处理每次灌溉后利用小麦侧水量为

$$W_{nw} = 100(T_{4s} - T_{5s})hs\mu \quad (3)$$

式中 W_{nw} ——尼龙网隔根处理利用小麦侧水量, m^3/hm^2

T_{4s} ——尼龙网隔根处理向日葵条带每次灌溉前的土壤体积含水率, %

T_{5s} ——塑料布隔根处理向日葵条带同一时间的土壤体积含水率, %

同理, 尼龙网隔根处理每次灌溉后利用向日葵侧水量为

$$W_{ns} = 100(T_{4w} - T_{5w})hs\eta \quad (4)$$

式中 W_{ns} ——尼龙网隔根处理利用向日葵侧水量, m^3/hm^2

T_{4w} ——尼龙网隔根处理小麦条带每次灌溉前的土壤体积含水率, %

T_{5w} ——塑料布隔根处理小麦条带同一时间的土壤体积含水率, %

1.3.6 间作优势

间作体系的间作优势常用 2 个指标来衡量, 一是土地当量比 (LER), 一是间作群体产量与相应作物同等面积单作时的产量差值。土地当量比 (LER) 计算公式为

$$LER = I_w/Y_w + I_s/Y_s \quad (5)$$

式中 I_w ——间作小麦产量, kg/hm^2

Y_w ——单作小麦产量, kg/hm^2

I_s ——间作向日葵产量, kg/hm^2

Y_s ——单作向日葵产量, kg/hm^2

间作群体产量与相应作物同等面积单作时的产量差值计算公式为

$$Y = Y_m - (Y_w\eta + Y_s\mu) \quad (6)$$

式中 Y ——间作群体产量优势, kg/hm^2

Y_m ——间作群体中小麦与向日葵产量之和, kg/hm^2

1.3.7 种间相对竞争能力

衡量间作系统中一种作物相对另一种作物对水肥等自然资源竞争能力的大小时常用种间相对竞争能力来表述, 本文以小麦相对向日葵对资源竞争能力的大小进行计算, 为

$$A_{ws} = I_w/(Y_w\eta) - I_s/(Y_s\mu) \quad (7)$$

式中 A_{ws} ——间作群体中小麦相对于向日葵资源竞争能力

当 $A_{ws} > 0$, 表明间作群体中小麦的竞争能力强于向日葵; 当 $A_{ws} < 0$, 表明间作群体中小麦的竞争能力弱于向日葵。

1.4 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2003 进行处理, 用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析并进行差异显著性检验 (LSD 法), 检验不同处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理两作物条带土壤水分运移规律

由于间作系统中小麦与向日葵的播种与收获时间不同、根系分布规律不同、吸水规律及需水时间等的差异, 进而造成小麦、向日葵共生期内需水时间、空间上的错位, 这也为土壤水分在间作群体中进行优化配置成为可能。为了更准确更直观地体现出不同处理下两作物条带的土壤水分运移规律, 以各处理不同作物条带 100 cm 深土层的平均体积含水率为自变量, 以时间为因变量作图 (图 3, T1 麦表示单作小麦, T3 麦表示根系不分隔下的间作小麦, T4 麦表示尼龙网隔根下的间作小麦, T5 麦表示塑料布隔根下的间作小麦; T2 葵表示单作向日葵, T3 葵表示根系不分隔下的间作向日葵, T4 葵表示尼龙网隔根

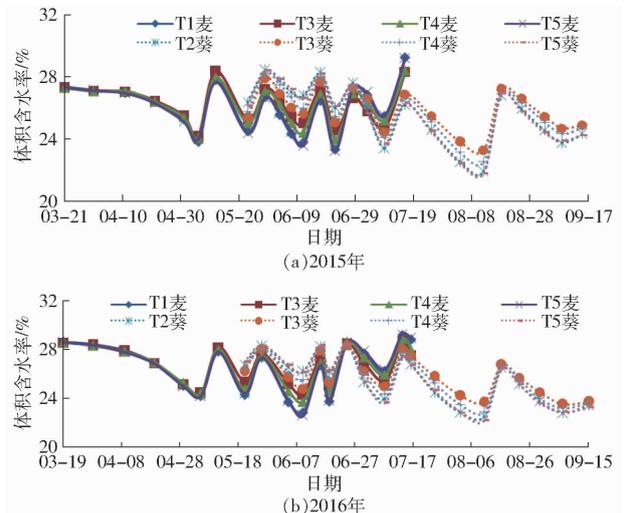


图3 各处理平均土壤含水率动态曲线

Fig. 3 Dynamic curves of average soil water with different treatments

下的间作向日葵, T5 葵表示塑料布隔根下的间作向日葵), 由图 3 可见不同处理整个生育期各作物条带平均土壤含水率(0~100 cm) 随时间的动态变化特征, 通过对图中间作模式下两不同作物条带的平均土壤含水率(0~100 cm) 变化规律可知, 间作系统中两作物条带间存在明显竞争与互补关系, 通过间作系统中两作物条带间土壤含水率(0~100 cm) 的差值大小即可看出, 共生前期两作物间土壤含水率(0~100 cm) 差值较大(麦-葵为负值, 说明此时向日葵条带是作为间作群体水源的角色而存在) 表现为明显的互补关系, 共生中期, 特别是四水前后的 6 月下旬左右, 当两作物条带间的平均土壤含水率差值为零或是接近于零, 这时两作物间表现为明显的竞争关系, 之后由于间作群体中的小麦逐渐成熟而需水减少, 两作物间土壤含水率(0~100 cm) 又逐渐增大(麦-葵为正值, 说明此时小麦条带是作为间作群体水源的角色而存在), 间作群体两作物间又回到互补关系当中。可见, 间作群体整个生育期对于水分的需求基本呈现“互补-竞争-互补”的过程, 且在四水前后的 6 月下旬出现补充水源角色的转变。

通过间作群体两作物间相互利用水量计算公式就可以计算出各处理每水灌溉后两作物间相互利用

水量及总利用水量(表 2), 由表 2 可知, 间作群体内部不隔根处理(T3) 小麦条带利用向日葵侧的水量是向日葵条带利用小麦侧水量的 1.35~2.10 倍, 尼龙网隔根处理(T4) 小麦条带利用向日葵侧的水量是向日葵条带利用小麦侧水量的 1.79~3.80 倍, 而不隔根处理(T3) 小麦条带利用向日葵侧的水量是尼龙网隔根处理(T4) 小麦条带利用向日葵侧水量的 1.36~1.98 倍, 不隔根处理(T3) 向日葵条带利用小麦侧水量是尼龙网隔根处理(T4) 向日葵条带利用小麦侧水量的 1.70~3.83 倍。可见, 间作群体内部小麦对水分的捕获能力强于向日葵, 且根系的交叉叠加效应有利于提升间作群体的吸水能力。此外, 通过对比尼龙网隔根处理(T4) 与塑料布隔根处理(T5) 可知, 水分与养分的互补效应可以多利用 15.12~26.40 m³/hm² 的小麦带土壤水量(T4 处理利用小麦侧水量), 47.60~57.44 m³/hm² 的向日葵带土壤水量(T4 处理利用向日葵侧水量)。而根系在土壤空间的交叉叠加效应可以多利用 18.56~42.84 m³/hm² 的小麦带土壤水量(T3 处理利用小麦侧水量-水分与养分互补效应利用小麦侧水量), 20.79~46.63 m³/hm² 的向日葵带土壤水量(T3 处理利用向日葵侧水量-水分与养分互补效应利用向日葵侧水量)。

表 2 间作群体全生育期两作物间相互利用水量

Tab. 2 Mutual use of water during whole period between two crops growth in intercropping system m³/hm²

年份	处理	一水	二水	三水	四水	五水	六水	合计
2015 年	T3 利用向日葵侧水量	39.06 ± 2.12	62.53 ± 3.42	61.92 ± 2.78	-39.21 ± 3.67	-46.07 ± 0.36		78.23
	T3 利用小麦侧水量		-57.63 ± 3.14	-47.53 ± 3.13	48.71 ± 3.96	68.22 ± 5.29	46.20 ± 0.87	57.97
	T4 利用向日葵侧水量	34.13 ± 2.08	42.87 ± 2.44	36.37 ± 2.47	-14.63 ± 0.85	-41.30 ± 1.24		57.44
	T4 利用小麦侧水量		-30.78 ± 1.12	-34.33 ± 1.65	19.36 ± 2.28	36.45 ± 2.84	24.43 ± 1.25	15.13
2016 年	T3 利用向日葵侧水量	55.21 ± 4.02	75.28 ± 5.27	67.36 ± 4.59	-40.18 ± 3.29	-63.44 ± 4.29		94.23
	T3 利用小麦侧水量		-69.79 ± 4.25	-43.44 ± 2.37	50.73 ± 4.37	58.61 ± 6.71	48.86 ± 3.67	44.96
	T4 利用向日葵侧水量	19.00 ± 0.87	57.40 ± 2.16	41.75 ± 3.68	-23.11 ± 0.96	-47.44 ± 2.09		47.60
	T4 利用小麦侧水量		-30.05 ± 1.17	-30.34 ± 2.74	35.66 ± 2.67	34.87 ± 2.37	16.25 ± 1.11	26.40

注:表中数据均为 3 次重复平均值,负值表示该作物反被另一侧作物利用或损失相应数值的水量,下同。

2.2 生育期前后小麦/向日葵间作群体地下部土壤盐分变化特征

间作群体生育期前后不同作物条带土壤盐分变化如表 3 所示,收获后小麦、向日葵作物条带均较播种前有较大幅度下降,这是由水分与养分传输及间作群体根系对肥料的高效利用共同作用的结果,通过对比收获后不同处理间两作物条带的差异可知,不隔根处理(T3) 小麦带土壤 EC 均值较单作(T1) 下降了 6.01%~7.62%,且差异显著($P < 0.05$),向日葵带较单作(T2) 下降了 4.70%~4.98%;尼龙网隔根处理(T4) 小麦带土壤 EC 均值较塑料布隔根处

理(T5) 下降了 2.98%~4.69%,向日葵带下降了 1.82%~2.44%。可见,小麦/向日葵间作群体仍具有一定的控盐作用。由试验设计可知,塑料布隔根处理(T5) 目的是隔断小麦、向日葵间水分与养分的交流及其根系间的相互交叉叠加,尼龙网隔根处理(T4) 目的是阻断小麦、向日葵间根系的相互交叉叠加,但不阻断两作物间水分与养分的相互传输,因此,其差值即表示由于水分与养分的互补效应而降低的土壤盐分,故水分与养分在小麦与向日葵间的互补效应可以降低 2.98%~4.69% 的小麦条带土壤 EC 均值,1.82%~2.44% 向日葵条带土壤 EC 均

值。而间作群体根系在土壤中的交叉叠加效应可以降低 1.32% ~ 4.64% 的小麦条带土壤 EC 均值(T3 处理小麦带土壤盐分下降值-水分与养分互补效应

降低的小麦带土壤盐分), 2.26% ~ 3.16% 的向日葵条带土壤 EC 均值(T3 处理向日葵带土壤盐分下降值-水分与养分互补效应降低的向日葵带土壤盐分)。

表 3 生育期前后不同作物条带土壤 EC 均值

Tab.3 Mean value of soil EC with different crop belts before and after growth period

mS/cm

年份	处理	播种前土壤 EC 均值		收获后土壤 EC 均值	
		小麦	向日葵	小麦	向日葵
2015 年	T1	0.728 ± 0.032		0.549 ± 0.037 ^a	
	T2		0.770 ± 0.041		0.442 ± 0.027
	T3	0.738 ± 0.028	0.766 ± 0.033	0.516 ± 0.041 ^{ab}	0.420 ± 0.014
	T4	0.742 ± 0.042	0.748 ± 0.029	0.528 ± 0.026 ^{ab}	0.431 ± 0.033
	T5	0.735 ± 0.016	0.768 ± 0.017	0.554 ± 0.015 ^a	0.439 ± 0.039
2016 年	T1	0.694 ± 0.044		0.538 ± 0.034 ^{ab}	
	T2		0.735 ± 0.036		0.447 ± 0.019
	T3	0.718 ± 0.025	0.728 ± 0.022	0.497 ± 0.032 ^b	0.426 ± 0.027
	T4	0.702 ± 0.011	0.754 ± 0.048	0.521 ± 0.021 ^{ab}	0.440 ± 0.030
	T5	0.683 ± 0.038	0.706 ± 0.051	0.537 ± 0.023 ^{ab}	0.451 ± 0.024

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平,下同。

2.3 小麦/向日葵间作优势与种间相对竞争能力

小麦/向日葵间作群体的间作优势不仅受地上部因素的影响,地下部因素对其贡献也颇多(表 4)。由间作群体的土地当量比(LER)可知,小麦/向日葵间作群体的土地利用效率较高。以作物单作时面积加权平均值为对照,T3 处理产量提高了 29.47% ~ 31.29%,T5 处理提高了 3.36% ~ 7.15%,说明河套灌区间作优势的 3.36% ~ 7.15% 来源于地上部分的贡献,而地下部分的贡献为 22.32% ~ 27.93%。以 T5 处理为对照,则 T4 处理产量提高了 6.28% ~ 14.14%,说明水分与养分在小麦/向日葵间作群体间的互补效应贡献了 6.28% ~ 14.14% 的间作优

势。因此,间作优势中的 13.79% ~ 16.04% 来源于间作群体根系的交叉叠加效应(地下部间作优势贡献率-水分养分互补效应贡献率)。

从可比面积上间作群体间净增产量可知,T3 处理净增产量为 1121 ~ 1182 kg/hm²,T5 处理净增产量为 127 ~ 272 kg/hm²,说明地上部分对间作优势的贡献率为 10.74% ~ 24.26%,而地下部分对间作优势的贡献率为 75.74% ~ 89.26%,T5 处理较 T4 处理产量优势下降了 22.84% ~ 46.70%,说明间作群体间水分养分的互补效应对间作优势的贡献率为 22.84% ~ 46.70%。小麦/向日葵间作群体根系交叉叠加效应对间作优势贡献率为 46.79% ~ 52.90%。

表 4 各处理间作优势与种间相对竞争能力

Tab.4 Intercropping advantages and relative competitive ability between two species among different treatments

年份	处理	产量/(kg·hm ⁻²)			LER	增产量/(kg·hm ⁻²)	种间相对竞争能力 A _{ws}
		小麦	向日葵	总产量			
2015 年	T1	3876 ± 134		3876 ± 134			
	T2		3675 ± 217	3675 ± 217			
	T3	2653 ± 158	2306 ± 142	4959 ± 150	1.31 ± 0.03 ^a	1182 ± 62 ^a	0.074 ± 0.004
	T4	2374 ± 137	2082 ± 98	4456 ± 118	1.18 ± 0.02 ^b	679 ± 48 ^b	0.056 ± 0.003
	T5	2006 ± 132	1898 ± 107	3904 ± 119	1.03 ± 0.02 ^c	127 ± 11 ^c	-0.030 ± 0.003
2016 年	T1	4012 ± 234		4012 ± 234			
	T2		3589 ± 205	3589 ± 205			
	T3	2708 ± 114	2217 ± 155	4925 ± 135	1.29 ± 0.02 ^a	1121 ± 53 ^a	0.075 ± 0.005
	T4	2317 ± 87	2015 ± 121	4332 ± 104	1.14 ± 0.03 ^b	528 ± 37 ^c	-0.003 ± 0.006
	T5	2138 ± 124	1937 ± 93	4076 ± 109	1.07 ± 0.02 ^c	272 ± 16 ^d	-0.047 ± 0.004

从间作群体两作物种间相对竞争能力上看,间作群体内小麦的竞争能力强于向日葵(不隔根处理小麦相对于向日葵的种间相对竞争能力均大于

零),而阻断小麦与向日葵间根系的交叉叠加(T4)会降低小麦的种间竞争能力(尼龙网隔根处理小麦相对于向日葵的种间竞争能力均小于不隔根处

理),完全阻止根系的交叉叠加与水分养分在两作物间的传输补给(T5),则会提升向日葵的种间竞争能力(塑料布隔根处理小麦相对于向日葵的种间竞争能力均小于零),使间作群体中的小麦由优势种变为劣势种。由表4可知,阻断小麦/向日葵间作群体的根系交叉叠加会降低17.31%~63.93%的小麦相对于向日葵的竞争能力,而阻断小麦/向日葵间作群体的水分养分交流则会降低36.07%~82.69%的小麦相对于向日葵的竞争能力,可见小麦/向日葵间作群体内部的竞争主要来源于两作物对水分养分的竞争。

3 讨论

近年来,间作因明显的节约资源和稳产潜力,被国内外学者作为农业可持续发展的重要模式进行了更深入的研究,且模式日益多样化^[3,9,11,14,16-17,21]。大量研究表明在多种间作体系间存在间作优势^[14-20],但目前关于地上部与地下部因素对间作优势的相对贡献率研究比较少^[14,16-17],且多认为间作群体的间作优势以地上部贡献为主,以地下部分贡献为辅^[14,17],这与本研究结果不一致,本研究认为河套灌区的间作优势以地下部贡献为主体,这与吕越等^[16,23]的研究结论一致,其产生原因可能为各试验地区及灌溉方式不同,进而各试验区气候、降雨量、降雨强度及地下水埋深等迥异,导致小麦/向日葵间作群体地下部分两作物间的竞争强度明显低于河套灌区,相应的两作物间水分养分的交流过低所致。

综合国内外众多研究成果可知,间作能够促进植物体根系对农田水分的充分利用,这有利于增加根层土壤的可用水量^[1-3,5-6,9-10]。此外,间作模式优化了作物系统的源-库结构,创造出了更有利于植物生长发育的田间小环境,为资源在时间和空间上的集约利用和高产打下坚实基础^[2-6,10,22-26]。这是因为间作群体内的两作物由于根系分布及吸水吸肥空间不同,产生不同组分享有限资源的互补效应^[26],间作为资源需求特性不同的两作物提供了从时间到空间利用生态位分异的基础,促进了种间互补效应对相关资源的高效利用,或是一种作物为群体内另一种作物直接提供资源^[27],形成了种间互补效应,即利用不同库存物质。但是,间作模式水分高效利用的形成涉及到植物体本身的生理生态特性,以及不同植物体间对水肥资源及相关资源在时间与空间上的竞争互补,且本质上决定了竞争与互补的动态博弈^[28],这对量化间作作物对土壤水肥资源的竞争和互补效应产生了难题。本研究通过采用不同分隔方式对小麦/向日葵间作群体进行了研究,量化

分析了间作群体内两作物间的相互利用水量,并进一步明确水分养分互补效应与根系交叉叠加效应各自多利用的水量及降低的土壤盐分,最终揭示了间作群体在不增加农田灌溉水量的同时大幅提高单位面积产量,促进作物水分利用效率明显提高的机理。由此说明,有限资源的互补利用预示着相对竞争作用的减弱和产量优势的形成,结合间作作物的生长发育情况可知,量化种间竞争能力及互补水量,为人为调控间作群体的水分高效利用特性创造了切入点。

纵观间作群体的相关研究不难发现,基于收获期间作产量优势的成果较多^[11,14-18],但对揭示间作群体根系间互补动态的研究成果鲜见报道^[19,23]。然而,基于收获期的各类指标是间作群体生命过程的最终体现,且相对稳定,难以揭示群体内两作物间的相关关系的动态变化,因而以这些指标做出的结论难以系统、精确地为间作模式制定科学合理的灌溉制度提供理论依据。此外,间作群体根系的时空分布与生理特性是响应土壤水分变化的重要因子,广泛用于挖掘作物本身的节水潜力。相反,间作复合群体如何通过对水分供给的调控而控制根系,并产生对水分的互补利用效应,是间作群体将来的研究重点。在间作群体中,采用不同分隔方式使植物根系在空间生态位上产生互补与竞争,既体现出根系在空间上的交叉叠加,又会引起植物体内部生理生态学特性的变化,这是决定地上部因素与地下部因素作用大小的重要因素^[25]。因此,如果人为对复合群体进行主动调控,利用间作群体在时间与空间上的生态位分离及对资源的需求差异,可进一步明确群体内部的竞争机理。针对这些问题,本研究通过量化间作群体内每水灌溉后两作物间的相互利用水量及收获时的间作优势与控盐效果,系统性地明确了小麦/向日葵间作模式的水盐运移机理及种间竞争机理,对于创建间作的高产高效精准灌溉管理制度具有重要的实际意义。

4 结论

(1)小麦/向日葵间作群体全生育期内小麦条带利用向日葵侧的水量为78.23~94.23 m³/hm²,向日葵条带利用小麦侧水量为44.96~57.97 m³/hm²。其中根系在土壤空间的交叉叠加效应可以利用18.56~42.84 m³/hm²的小麦带土壤水量,20.79~46.63 m³/hm²的向日葵带土壤水量,水分与养分的互补效应可以利用15.12~26.40 m³/hm²的小麦带土壤水量,47.60~57.44 m³/hm²的向日葵带土壤水量。

(2) 小麦/向日葵间作群体具有轻度的控盐作用,间作群体可降低 6.01% ~ 7.62% 的小麦带土壤 EC 均值,4.70% ~ 4.98% 的向日葵条带土壤 EC 均值。其中根系在土壤中的交叉叠加效应可以降低 1.32% ~ 4.64% 的小麦条带土壤 EC 均值,2.26% ~ 3.16% 的向日葵条带土壤 EC 均值,而水分和养分在小麦与向日葵间的互补效应可以降低 2.98% ~ 4.69% 的小麦条带土壤 EC 均值,1.82% ~ 2.44% 向日葵条带土壤 EC 均值。

(3) 以 LER 为依据的间作群体总产量优势为 29.47% ~ 31.29%。其中 3.36% ~ 7.15% 来自于地上部分的贡献,22.32% ~ 27.93% 来源于地下部

分的贡献,地下部分贡献中 13.79% ~ 16.04% 来源于间作群体根系的交叉叠加效应,6.28% ~ 14.14% 来自于水分养分的互补效应。以可比面积上的净增产量为依据的间作优势中地上部分的贡献率为 10.74% ~ 24.26%,而地下部分的贡献率为 75.74% ~ 89.26%,地下部分贡献中有 46.79% ~ 52.90% 来源于根系的交叉叠加效应,22.84% ~ 46.70% 来自于水分养分的互补效应。种间相对竞争能力上,间作群体的根系交叉叠加效应会提升 17.31% ~ 63.93% 的小麦相对于向日葵的竞争能力,水分养分的交流则会提升 36.07% ~ 82.69% 的小麦相对于向日葵的竞争能力。

参 考 文 献

- 1 王仰仁,李明思,康绍忠.立体种植条件下作物需水规律研究[J].水利学报,2003,34(7):90-95.
WANG Yangren, LI Mingsi, KANG Shaozhong. Efficient water use in strip intercropping production [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 90-95. (in Chinese)
- 2 高阳,段爱旺,刘浩,等.间作条件下水分在作物间的分配与利用研究进展[J].农业工程学报,2007,23(7):281-285.
GAO Yang, DUAN Aiwang, LIU Hao, et al. Research progress of water partitioning and use in intercropping systems [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 281-285. (in Chinese)
- 3 MIAO Q F, RICARDO D R, SHI H B, et al. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach [J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 211-229.
- 4 HU F L, FENG F X, ZHAO C, et al. Integration of wheat-maize intercropping with conservation practices reduces CO₂ emissions and enhances water use in dry areas [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 44-53.
- 5 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.
- 6 WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, et al. Water use and crop coefficient of the wheat-maize strip intercropping system for an arid region in northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 161: 77-85.
- 7 WANG Z K, ZHAO X N, WU P T, et al. Radiation interception and utilization by wheat/maize strip intercropping systems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 58-66.
- 8 GOU F, MARTIN K I, ELISABETH S, et al. Intercropping wheat and maize increases total radiation interception and wheat RUE but lowers maize RUE [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 125-139.
- 9 高阳,段爱旺,刘战东,等.玉米/大豆间作条件下的作物根系生长及水分吸收[J].应用生态学报,2009,20(2):307-313.
GAO Yang, DUAN Aiwang, LIU Zhandong, et al. Crop root growth and water uptake in maize/soybean strip intercropping [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 307-313. (in Chinese)
- 10 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 Fengyun, WU Pute, ZHAO Xining, 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. (in Chinese)
- 11 陈国栋,柴强.根系分隔和供水水平对玉米间作豌豆产量和耗水特征的影响[J].西北农业学报,2013,22(12):25-30.
CHEN Guodong, CHAI Qiang. Effects of root separation and irrigation on yields and water use characteristics of maize pea intercropping systems [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(12): 25-30. (in Chinese)
- 12 李仙岳,史海滨,龚雪文,等.立体种植农田不同生育期及土壤水分的根系分布特征[J/OL].农业机械学报,2014,45(3):140-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140324&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.024.
LI Xianyue, SHI Haibin, GONG Xuewen, et al. Root distribution in strip intercropping field under different growth period and different soil water [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 140-147. (in Chinese)
- 13 XIA H Y, ZHAO J H, SUN J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates [J]. Field Crops Research, 2013, 150: 52-62.
- 14 刘广才,李隆,黄高宝,等.大麦/玉米间作优势及地上部和地下部因素的相对贡献研究[J].中国农业科学,2005,38(9):1787-1795.
LIU Guangcai, LI Long, HUANG Gaobao, et al. Intercropping advantage and contribution of above-ground and below-ground

- interactions in the barley-maize intercropping[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9):1787–1795. (in Chinese)
- 15 LI L, SUN J, ZHANG F, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. *Oecologia*, 2006, 147: 280–290.
- 16 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(1):129–136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140121&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.021.
- LÜ Yue, WU Pute, CHEN Xiaoli, et al. Effect of above-and below-ground interactions on maize/soybean intercropping advantage [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1):129–136. (in Chinese)
- 17 李隆, 杨思存, 孙建好, 等. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2):197–200.
- LI Long, YANG Sicun, SUN Jianhao, et al. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):197–200. (in Chinese)
- 18 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争能力及产量响应[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1):31–34.
- QI Wanhai, CHAI Qiang. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 31–34. (in Chinese)
- 19 张作为, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区间作系统根系土壤水盐运移机理及间作优势研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(4): 408–416.
- ZHANG Zuwei, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Research on the mechanism of water and salt transport in root soil and the advantage of intercropping system in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(4):408–416. (in Chinese)
- 20 BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1):107–117.
- 21 GAO Y, DUAN A W, QIU X Q, et al. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1):199–212.
- 22 LI X Y, JIŘÍ Š, SHI H B, et al. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a dripirrigated intercropping field with plastic mulch[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 83:47–56.
- 23 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):139–146.
- LÜ Yue, WU Pute, CHEN Xiaoli, et al. Resource competition in maize/soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):139–146. (in Chinese)
- 24 WAHLA I H, AHMAD R, AHMAD A, et al. Competitive functions of components crops in some barley based intercropping systems[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2009, 11(1):69–72.
- 25 柴强, 殷文. 间作系统的水分竞争互补机理[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(1):233–239.
- CHAI Qiang, YIN Wen. Research advances in water competition and complementary interaction of intercropping agroecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(1):233–239. (in Chinese)
- 26 YIN W, YU A Z, CHAI Q, et al. Wheat and maize relay-planting with straw covering increases water use efficiency up to 46% [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2):815–825.
- 27 TAKIM F O. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. *Journal of Agriculture and Biodiversity Research*, 2012, 1:53–59.
- 28 GHOSH P K, TRIPATHI A K, BANDYOPADHYAY K K, et al. Assessment of nutrient competition and nutrient requirement in soybean/sorghum intercropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1):43–50.