

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.027

不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体响应机理研究

张作为¹ 李宏宇² 付强¹ 史海滨³ 刘德平¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030;
3. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明不同水分胁迫下小麦/玉米间作群体响应机理, 试验设置了 1 个充分灌水、3 个不同水分胁迫程度间作处理及 2 个充分灌水单作对照处理。结果表明: 共生期内, 各间作处理间普遍存在小麦条带水分捕获当量比高于玉米条带的现象, 随水分胁迫的加剧, 此趋势愈加明显; 随着生育期的推进, 此趋势渐弱甚至出现反转, 而带间的水分相对竞争能力则呈现逐渐下降的规律。在根系分布特征方面, 充分灌溉下间作群体平均根系分布深度为 17.15 ~ 17.24 cm, 其根质量密度的 90.42% ~ 90.77% 分布于耕层内, 其中小麦为 87.49% ~ 88.70%, 玉米为 92.63% ~ 92.81%, 而水分胁迫会显著影响间作群体根系的空间分布。在间作优势方面, 要保持间作优势, 每次灌水最少需满足 80% 左右的田间持水率, 随水分胁迫程度的增加, 间作群体土地当量比呈现先微升、后下降的规律, 且间作玉米的偏土地当量比下降速率快于间作小麦。在种间相对竞争能力方面, 表现出随水分胁迫的加剧, 小麦相对于玉米先微升、后快速下降, 并逐渐近于消失的趋势。间作群体的特殊性造成了两作物条带存在时间与空间上的土壤水分差异, 进而导致灌溉水入渗速度及入渗总量的不同, 而水分胁迫增大了这种趋势, 这在一定程度上满足了灌溉水的最佳去处, 从而提高了间作群体的水分利用效率, 进而揭示了间作群体的节水增产机理。

关键词: 间作群体; 水分捕获当量比; 水分相对竞争能力; 根系质量密度分布; 种间相对竞争能力

中图分类号: S152.7; S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)01-0245-11 **OSID:** 

Response Mechanism of Wheat/Maize Intercropping System under Different Water Stresses

ZHANG Zuwei¹ LI Hongyu² FU Qiang¹ SHI Haibin³ LIU Deping¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: In order to find out the response mechanism of wheat/maize intercropping population under different water stresses, three intercropping treatments with sufficient water stress levels and two sufficient irrigation singles were used for the control treatment. The results showed that the water capture equivalent ratio of wheat strips was higher than that of corn strips in the intercropping period. With the increase of water stress, the trend became more and more obvious. With the growth of the growth period, the trend became weaker and even appeared reverse, while the relative competitiveness of water between the belts showed a gradual decline. In terms of root distribution characteristics, the average root distribution depth of the intercropped population under full irrigation was 17.15 ~ 17.24 cm, and the root mass density was 90.42% ~ 90.77% distributed in the plough layer, of which 87.49% ~ 88.70% was wheat and 92.63% ~ 92.81% was corn, and water stress can significantly affect the spatial distribution of intercropping population roots. In terms of intercropping advantages, it was necessary to have the intercropping advantage to satisfy the field water holding rate of at least 80% per water. With the increase of water stress degree, the land equivalent ratio of the intercropping group showed a slight increase and then declined, and the intercropping of corn was partial land. The rate of decline in equivalence ratio was

收稿日期: 2019-05-29 修回日期: 2019-07-16
基金项目: 黑龙江省博士后面上资助经费项目(LBH-Z17033)、国家自然科学基金重点项目(51539005)和东北农业大学青年才俊项目(19QC16)
作者简介: 张作为(1985—),男,讲师,博士,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: 付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析研究,E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

faster than that of intercropped wheat. In terms of relative competition ability between species, it showed that with the increase of water stress, the wheat was decreased rapidly and gradually disappeared after it was slightly increased. In short, the particularity of the intercropping group caused the difference in soil moisture between the two crops in time and space, which in turn caused the difference in irrigation water infiltration rate and total infiltration, and water stress increased this trend, which was certain to the extent that the optimal location of irrigation water was satisfied, the water use efficiency of the intercropping group was improved, and the mechanism of water saving and yield increase of the intercropping group was revealed.

Key words: intercropping system; water capture equivalent ratio; water relative competitiveness; root mass density distribution; relative competitive ability

0 引言

水资源短缺及时空分布不均是制约我国农业生产发展的主要限制因子^[1],农业水资源高效利用已经成为威胁国家粮食安全与农业可持续发展的瓶颈,提高农作物对有限水资源的利用效率不仅是灌溉农业发展的潜力所在,也是目前农业发展的首要问题。间作作为一种历史悠久的高效集约化种植方式,通过对不同作物在时间和空间上的合理搭配,提高了水分、养分、光能等资源的利用效率^[2-3],增加了单位土地面积产出比,对保障国家粮食安全起到了重要作用^[4-5]。河套灌区作为我国三大灌区之一,地处干旱缺水的西北高原,光热及风能资源丰富,是国内间作模式的主要种植区之一。同时,带状间作种植模式形成的生物篱还是一种春季防风固沙的重要生态措施^[6],对于改善我国华北乃至东北地区沙尘天气具有显著作用。灌区降雨少、蒸发大,属于没有引水灌溉便没有农业的地区。近年来由于引黄配额下降,加之用水效率低下,造成灌区农业用水压力增大。为实现灌区水资源的高效可持续利用,间作又重新引起了当地学者的广泛关注^[7-8]。一般认为,间作群体水资源利用效率低,且水分亏缺,会因间作群体产量的大幅下降而丧失了间作优势,失去了间作增产的价值。这主要是因为缺乏对间作群体水分利用特征的了解而引起的错误认知。

在有限的水资源下,如何同步提升间作群体的水分利用效率和作物产量仍是当前节水农业生产所面临的关键问题。目前,国内外学者对间作群体的研究已经达到一定的深度和广度,其中对于小麦和玉米搭配间作也进行了大量报道,但多集中在吸水规律^[9-10]、间作优势^[11-12]、根系分布^[13]等方面,对水分胁迫下间作群体的土壤水分运动特征研究相对薄弱^[14],对缺水导致的水分捕获能力变化及根系再分布问题则更是鲜有报道。而且对于间作农田水资源高效利用的节水机理仍认识不清,大都认为间作通过边行的增产效应来提高水分利用效率,进而达

到水资源的高效利用^[3,15]。此外,减少引黄水量对于降低河套灌区地下水位、改善蒸腾蒸发导致的土壤次生盐渍化也具有重要的现实意义。

为此,本研究通过开展小麦/玉米间作群体不同水分胁迫下的作物水分利用特征、根系分布特征及土地生产力等方面的系统性研究,探明不同水分胁迫对间作群体水分时空消耗与产量的关系来挖掘其土地生产潜力,以期从间作作物生理机制层面指导节水农业实践,提高有限水资源的经济效益,为小麦/玉米间作群体水资源的科学调控提供理论依据,为构建灌区高产、高效、可持续发展的间作种植模式提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017—2018年在内蒙古自治区河套灌区磴口县坝楞村农业综合节水示范区(40°24′32″N, 107°2′19″E)进行。试验区年均降雨量144.5 mm,年均气温7.6℃,蒸发量2 343.2 mm,海拔1 048.7 m,属中温带大陆性季风气候。试验田前茬为向日葵,土壤容重为1.49 g/cm³,土壤质地为粉砂质粘壤土,土壤耕层有机质质量比为10.8 g/kg,碱解氮质量比175.4 mg/kg,速效磷质量比17.2 mg/kg,速效钾质量比132.3 mg/kg,田间持水率37.2%(体积含水率,环刀法)。

1.2 试验设计

试验共设6个处理,每处理3个重复,试验设计见表1。各小区间随机机组排列。试验供试小麦为永良4号,供试春玉米为西蒙168。单作与间作在净占地面积上播种密度相同,其中小麦450万粒/hm²,行距12 cm,每带种6行;玉米8.25万株/hm²,行距40 cm,株距30 cm,每带种植1膜2行。小区长6 m,宽3.2 m,间作每小区播种2个自然带,具体布置见图1。小区四周修筑高30 cm、宽50 cm的畦埂以防灌溉水外流,畦埂内部埋设1.3 m深的塑料布以防止小区内水分外渗。2017年小麦于3月20日播

种,4月4日出苗,7月16日收获,玉米于4月20日播种,5月2日出苗,9月13日收获,两作物共生期为75 d;2018年小麦于3月19日播种,4月4日出苗,7月16日收获,玉米于4月19日播种,5月5日出苗,9月15日收获,两作物共生期为78 d。小麦施纯 N 量 225 kg/hm²,50%作基肥,50%头水前追施,施纯 P₂O₅量 150 kg/hm²,全作基肥;玉米施纯 N 量 350 kg/hm²,60%作基肥,40%大喇叭口期一次性追施,施纯 P₂O₅量 225 kg/hm²,全作基肥。2017 年灌水日期为:5月7日、5月24日、6月12日、7月4日、8月13日;2018年灌水日期为:5月6日、5月21日、6月10日、7月8日、8月11日。

表 1 试验处理设计

Tab.1 Design of experimental treatments		
处理	种植模式	灌水设计
T1	单作小麦	田间持水率
T2	单作玉米	田间持水率
T3	小麦/玉米间作	田间持水率
T4	小麦/玉米间作	90%田间持水率
T5	小麦/玉米间作	80%田间持水率
T6	小麦/玉米间作	70%田间持水率

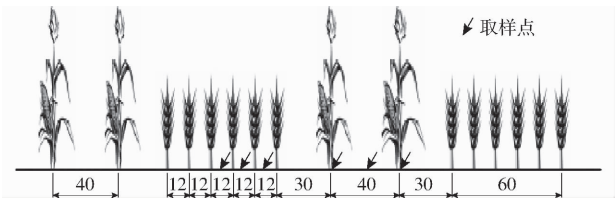


图 1 小麦/玉米间作群体中作物田间分布示意图
Fig.1 Location of intercropped crops in wheat/maize intercropping system of field

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气象数据

气象数据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1 h,可以测定田间降雨量、温度、风速、太阳辐射等气象资料。试验间作群体全生育期的降雨量如图2所示。

1.3.2 土壤含水率

土壤含水率测量的取样深度为0~100 cm,每20 cm一层,采用土钻取土干燥称量法测定,取样时间视灌水与降雨情况而定,灌水前后加测。

1.3.3 灌水量

通过每次灌水前土壤含水率与灌水设计水量差值计算,计算公式为

$$W = \gamma A [(W_s - W_{w0}) S_w \mu + (W_s - W_{m0}) S_m \eta] / 100$$

(1)

式中 W——灌水量,m³/hm²
γ——土壤容重,g/cm³

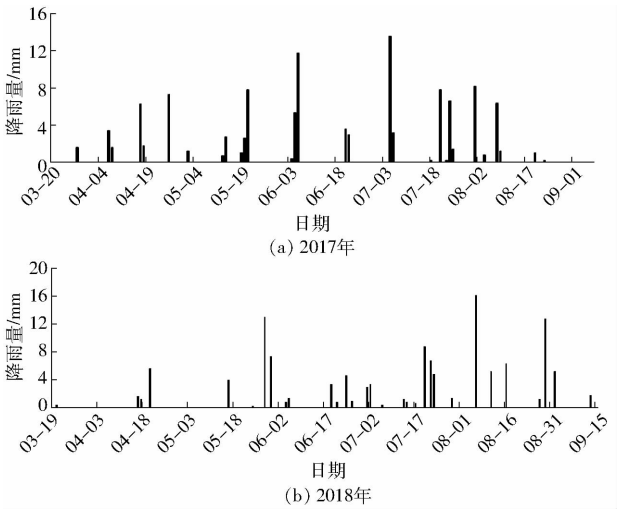


图 2 作物全生育期内降雨量

Fig.2 Rainfall amount during whole period of crop growth

- S_w ——小麦条带计划湿润层深度,取 100 cm
- S_m ——玉米条带计划湿润层深度,取 100 cm
- A ——试验小区面积,m²
- W_s ——设计含水率上限,%
- W_{w0} ——灌水前小麦条带土壤实测含水率,%
- W_{m0} ——灌水前玉米条带土壤实测含水率,%
- μ ——小麦条带面积占小区总面积百分比,%
- η ——玉米条带面积占小区总面积百分比,%

1.3.4 根系质量密度及平均分布深度与水平扩散距离

分别于2017年6月25日和2018年6月24日通过剖面法,选择生长旺盛期的小麦/玉米植株进行间作模式下的根系分布特征研究。考虑实际工作量,每次取根2次重复。取根水平位置为从小麦行到玉米主根处,垂直方向为垂向直到无根为止。具体做法为:水平和垂直方向均以5 cm为一层,厚度也为5 cm,直到无根为止。将土样带回实验室用清水浸泡6 h,过0.5 mm土壤筛,并将过筛后的根系分离,用水冲洗(玉米根较小麦根白且粗),然后将根系在80℃加热干燥至质量恒定,用测量精度为万分之一的天平称量,并计算单位体积下的根系质量。根据过筛后的根系记录根系分布信息并计算根系平均分布深度,根系平均分布深度计算为

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^6 g_{ij} h_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^6 g_{ij}}$$

(2)

式中 H——根系平均分布深度,cm
g——每样根系干质量,g
h——每样分布深度,cm
i——水平向样数 j——垂直向层数
n——总层数,直到无根为止

同理,根系的平均水平扩散距离为

$$S = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^6 g_{ij} l_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^6 g_{ij}} \quad (3)$$

式中 S ——根系平均扩散距离,cm
 l ——每样平均扩散距离,cm

1.3.5 间作优势

间作群体的间作优势通常用土地当量比(LE_R)与间作群体产量同相应作物相同面积单作时的产量差值 2 个指标来衡量。土地当量比计算公式为^[16-17]

$$P_{LER} = P_{LERw} + P_{LERm} = I_w/Y_w + I_m/Y_m \quad (4)$$

式中 P_{LER} ——间作群体的土地当量比
 P_{LERw} ——间作中小麦的相对产量,也称间作小麦的偏土地当量比
 P_{LERm} ——间作中玉米的相对产量,也称间作玉米的偏土地当量比
 I_w ——间作小麦产量,kg/hm²
 Y_w ——单作小麦产量,kg/hm²
 I_m ——间作玉米产量,kg/hm²
 Y_m ——单作玉米产量,kg/hm²

间作群体产量与相应作物相同面积单作时的产量差值计算公式为^[15,18]

$$Y = Y_s - (Y_w\mu + Y_m\eta) \quad (5)$$

式中 Y ——间作群体产量,kg/hm²
 Y_s ——间作群体中小麦与玉米产量和,kg/hm²

1.3.6 种间相对竞争能力

衡量间作群体两种作物中一种作物相对于另一种作物对水、热、光能、肥料等资源竞争能力时常用种间相对竞争能力(Relative competitive ability of species)来比较,本文以小麦相对于玉米对自然资源竞争能力进行计算^[18-19],即

$$A_{wm} = I_w/(Y_w\mu) - I_m/(Y_m\eta) \quad (6)$$

式中 A_{wm} ——间作群体中小麦相对于玉米的资源竞争能力

当 $A_{wm} > 0$,表明间作群体中小麦的竞争能力高于玉米;当 $A_{wm} < 0$,表明间作群体中小麦的竞争能力低于玉米。

1.3.7 水分捕获当量比与水分相对竞争能力

为量化分析不同水分胁迫下小麦/玉米间作群体的水分捕获能力,采用水分捕获当量比(Water capture equivalence ratio)来进行量化分析,其定义为灌水后(灌后 3 h)间作群体内各作物条带的捕获水量与该条带通过土壤含水率测量与试验设计确定的应灌水量的比值,其计算公式为

$$M = q/W_1 \quad (7)$$

$$q = (W_x - W_0)h_s k \quad (8)$$

其中 M ——间作群体不同作物条带水分捕获当量比
 q ——间作群体中同一作物条带每水灌后该条带的水分捕获量,m³/hm²
 W_1 ——间作群体中同一作物条带每水应灌水量,m³/hm²
 W_x ——灌水后各作物条带土壤实测体积含水率,%
 W_0 ——灌水前各作物条带土壤实测体积含水率,%
 h_s ——各作物条带计划湿润层深度,m
 k ——各作物条带面积占小区总面积百分比,%

间作群体两作物条带水分捕获当量比的差值即为间作群体内的水分相对竞争能力,可用来衡量间作群体中一种作物相对于另一种作物对水资源竞争能力,本文以小麦相对于玉米对水资源竞争能力来进行计算,即

$$L_{wm} = M_w - M_m \quad (9)$$

式中 L_{wm} ——间作群体内部的水分相对竞争能力
 M_w ——间作群体内小麦条带的水分捕获当量比
 M_m ——间作群体内玉米条带的水分捕获当量比

1.3.8 下扎程度与聚拢程度

根系的下扎程度定义为根系垂向分布在耕层(40 cm)以下的根系干质量与分布在耕层(40 cm)以内的根系干质量比值,简称下扎度。

根系的聚拢程度定义为间作群体每种作物根系水平分布在距该行作物 10 cm 以外的根系干质量与分布在 10 cm 范围以内的根系干质量比值,简称聚拢度。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 处理计算试验数据,利用 Surfer 8.0 软件绘制根系质量密度分布图,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)。

2 结果与分析

2.1 间作群体土壤水分运动特征

由于间作群体的特殊性,造成群体内部根系分布与需水临界期的时空差异,进而为土壤水分在间作群体内的高效利用提供了条件。为了更直观地体现不同水分胁迫处理下间作群体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,

结果如图 3(图中 T3 麦 ~T6 麦和 T3 玉 ~T6 玉分别表示不同处理下的小麦带和玉米带)所示,不同水分胁迫处理下的 0 ~ 100 cm 深不同作物条带间土壤体积含水率差异明显,均表现为随着生育进程的推进,两作物条带体积含水率逐渐降低,灌水后出现显著提升,又随着作物生长吸水逐渐下降的循环往复过程。但也表现出一定的规律性,如随着小麦、玉米生育进程的推进,间作群体在 6 月底 7 月初的 4 水前后迎来群体内最剧烈的水分竞争时段,并出现水源角色的互换。此外,各不同水分胁迫处理下的两作物条带 0 ~ 100 cm 深土壤含水率均未表现出交叉现象,均呈现近似平行的规律,且相同水分胁迫处理下的两作物条带间土壤含水率下降速率由共生前期的差距较大,逐渐变为 3 水过后的相近及 4 水过后的继续增大,说明不同的水分胁迫会直接影响土壤含水率,进而影响根系的吸水。

通过对不同水分胁迫处理下两作物条带 100 cm 深土层的全生育期平均体积含水率对比可知。相较于未受水分胁迫的 T3 处理(100% 田间持水率),T4 处理(90% 田间持水率)小麦条带 100 cm 深土层的全生育期平均体积含水率下降了 2.50 ~ 2.52 个百分点,玉米条带下降了 2.41 ~ 2.65 个百分点;T5 处理(80% 田间持水率)小麦条带 100 cm 深土层的全生育期平均体积含水率下降了 4.31 ~ 5.52 个百分点,玉米带下降了 5.72 ~ 6.66 个百分点;T6 处理(70% 田间持水率)小麦条带 100 cm 深

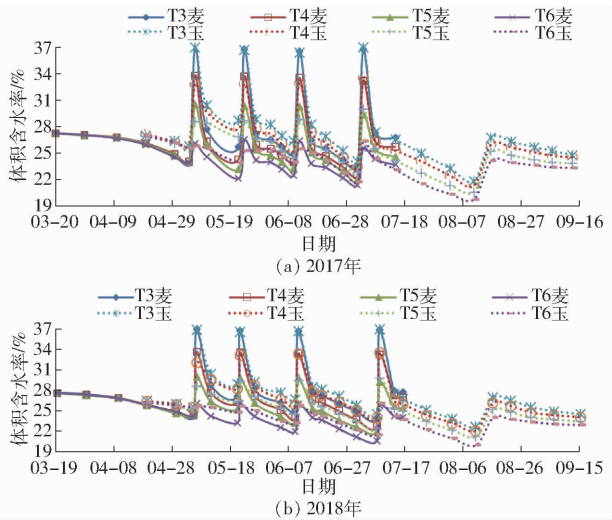


图 3 各处理平均土壤含水率动态曲线

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

土层的全生育期平均体积含水率下降了 6.88 ~ 9.39 个百分点,玉米条带下降了 9.44 ~ 10.73 个百分点。可见,相同水分胁迫处理下的两作物条带间其 100 cm 深土层的全生育期平均体积含水率下降速率不同,随着水分胁迫的加剧,玉米条带全生育期平均体积含水率下降速率明显快于小麦条带。为进一步明确不同水分胁迫下间作群体内部各作物条带水分捕获能力,本试验重点监测了共生期内每水灌溉后 3 h 时各不同处理作物条带的水分捕获当量比及其水分相对竞争能力,结果如表 2 所示。

表 2 不同处理下各作物条带水分捕获当量比与水分相对竞争能力

Tab.2 Water capture equivalence ratio and relative competitiveness of water with various crop strips under different treatments													
年份	处理	1 水			2 水			3 水			4 水		
		M_w	M_m	L_{wm}	M_w	M_m	L_{wm}	M_w	M_m	L_{wm}	M_w	M_m	L_{wm}
2017	T3	0.99	0.98	0.01	0.97	0.94	0.03	0.95	0.93	0.02	0.97	0.98	-0.01
	T4	1.04	0.92	0.12	1.03	0.90	0.13	1.01	0.94	0.07	0.98	1.01	-0.03
	T5	1.13	0.72	0.41	1.10	0.64	0.46	1.08	0.83	0.25	0.96	1.04	-0.08
	T6	1.04	0.60	0.44	1.13	0.63	0.50	1.11	0.77	0.34	0.90	1.08	-0.18
2018	T3	0.98	0.97	0.01	0.96	0.93	0.03	0.96	0.95	0.01	0.97	0.98	-0.01
	T4	1.03	0.83	0.20	1.02	0.95	0.07	0.99	0.98	0.01	0.99	1.01	-0.02
	T5	1.07	0.77	0.30	1.04	0.88	0.16	1.01	0.95	0.06	0.94	1.01	-0.07
	T6	1.08	0.50	0.58	1.04	0.76	0.28	1.02	0.93	0.09	0.96	1.03	-0.07

由表 2 可知,共生期内各间作处理间普遍存在小麦条带水分捕获当量比高于玉米条带水分捕获当量比的现象,只有第 4 水出现反转,且随水分胁迫的加剧,小麦条带的水分捕获当量比逐渐增加,玉米条带的水分捕获当量比则相反。这是由于共生前、中期,小麦条带需水量大,且同一水分胁迫处理下,共生期内普遍存在小麦条带 0 ~ 100 cm 深土层平均体

积含水率低于玉米条带的情况,特别是表层土壤含水率更是如此,而土壤含水率决定土壤入渗量与吸水能力,土壤含水率越低其吸水能力越强,入渗速率越大,因而同一水分胁迫处理间,小麦条带的吸水能力明显强于玉米条带。不同水分胁迫处理间,由于水分胁迫逐渐加剧,造成间作群体内部土壤水势梯度增大,灌溉水受小麦条带土壤介质的吸力增强,进

而小麦条带的灌溉水入渗能力增加,因此有限的水资源随着水分胁迫的加剧,小麦条带的水分捕获能力提升。此外,随生育期推进,还表现出小麦条带水分捕获当量比逐渐减小,玉米条带水分捕获当量比逐渐升高,且两作物条带间的水分相对竞争能力逐渐下降甚至变为负值的规律。这是由共生期内随生育进程的递进,两作物条带间的土壤水势梯度减小直至反转所致。另外,对于存在少部分数据不符合此规律的情况,这是由其应灌水量较少(各间作处理灌水量如表 3 所示),相应作物条带入渗时间较少导致入渗总量较低所致。

表 3 各间作处理灌水量
Tab. 3 Intercropping amount of irrigation m³

年份	处理	灌水量			
		1 水	2 水	3 水	4 水
2017	T3	3. 56	2. 89	3. 32	3. 86
	T4	2. 47	2. 19	2. 53	3. 01
	T5	1. 44	1. 41	1. 70	2. 10
	T6	0. 38	0. 88	0. 81	0. 97
2018	T3	3. 53	2. 64	3. 24	3. 71
	T4	2. 43	1. 80	2. 46	2. 90
	T5	1. 39	1. 14	1. 69	2. 16
	T6	0. 35	0. 60	0. 98	1. 43

2.2 间作群体根系质量密度分布特征

间作群体中作物根系要吸收更多的土壤水分,就要将根适应性地下扎,这会提高根系对深层土壤水分的吸收利用。此外,间作复合群体由于其固有的特性造成两种作物根系空间分布深浅搭配,更有利于深根系作物玉米通过根系提水作用,将土壤深层贮水通过根系传输到上层较干的土层进而增加土壤含水率,促进作物在干旱环境下更多地吸收利用土壤深层水分,缓解因缺水导致的浅根系作物枯萎甚至死亡,维持作物基本的生存和生产,并进一步增大了对深层土壤水分的利用。由图 4 可知,随着水分胁迫的加剧,小麦/玉米间作群体生育旺期根系的交叉范围和程度在逐步缩小。通过计算可知,T3 ~ T6 各处理其整体根质量密度分布于耕层(40 cm)内的比例分别为 90.42% ~ 90.77%、86.44% ~ 86.87%、79.75% ~ 82.08%、72.36% ~ 75.68%,其中 T3 处理小麦根质量密度的 87.49% ~ 88.70%、玉米根质量密度的 92.63% ~ 92.81% 均分布于耕层(40 cm)内,而 T4 ~ T6 处理其小麦与玉米根质量密度分布于耕层(40 cm)内的比例分别为 83.44% ~ 84.33%、79.27% ~ 80.11%、71.38% ~ 74.28% 与 88.76% ~ 88.96%、80.11% ~ 83.72%、73.13% ~ 76.75%,相较于 T3 处理,T4 ~ T6 处理其整体根质

量密度分布于耕层(40 cm)内的比例分别下降了 3.55 ~ 4.33 个百分点、8.34 ~ 11.02 个百分点、14.74 ~ 18.41 个百分点,其中 T4 ~ T6 处理其小麦与玉米根质量密度分布于耕层(40 cm)内的比例分别下降了 3.16 ~ 5.26 个百分点、7.38 ~ 9.43 个百分点、13.21 ~ 17.32 个百分点与 3.85 ~ 3.87 个百分点、9.09 ~ 12.52 个百分点、16.06 ~ 19.50 个百分点。间作群体根系平均分布深度方面,T3 ~ T6 处理其整体平均根系分布深度分别为 17.15 ~ 17.24 cm、19.59 ~ 20.36 cm、22.19 ~ 23.60 cm、26.17 ~ 27.76 cm,其中 T3 处理小麦、玉米条带平均根系分布深度分别为 18.37 ~ 18.90 cm、15.76 ~ 16.15 cm,T4 ~ T6 处理小麦、玉米条带平均根系分布深度分别为 20.98 ~ 21.65 cm、23.56 ~ 24.25 cm、27.17 ~ 28.83 cm 与 18.46 ~ 19.35 cm、21.05 ~ 23.12 cm、25.35 ~ 26.93 cm。可见,相较于水分充足的 T3 处理,不同水分胁迫下的 T4 ~ T6 处理其整体平均根系分布深度分别增加了 2.44 ~ 3.12 cm、5.04 ~ 6.36 cm、9.02 ~ 10.52 cm,其中 T4 ~ T6 处理小麦条带分别增加 2.61 ~ 2.75 cm、5.19 ~ 5.35 cm、8.80 ~ 9.93 cm,玉米条带分别增加 2.31 ~ 3.59 cm、4.90 ~ 7.36 cm、9.20 ~ 11.17 cm。间作群体根系水平扩散距离方面,T3 处理小麦条带的根系水平扩散距离为 6.33 ~ 6.96 cm,玉米条带的根系水平扩散距离为 4.83 ~ 4.92 cm,T4 ~ T6 处理小麦、玉米条带的根系水平扩散距离分别为 5.75 ~ 5.83 cm、5.28 ~ 5.37 cm、4.59 ~ 4.68 cm 与 4.60 ~ 4.75 cm、4.26 ~ 4.37 cm、4.09 ~ 4.14 cm。可见,相较于 T3 处理小麦与玉米条带的水平扩散距离,T4 ~ T6 处理小麦与玉米条带的水平扩散距离分别减少了 0.50 ~ 1.21 cm、0.96 ~ 1.68 cm、1.74 ~ 2.28 cm 与 0.08 ~ 0.32 cm、0.55 ~ 0.57 cm、0.74 ~ 0.78 cm。根系的下扎程度方面,T4 ~ T6 处理的整体下扎度较 T3 处理分别提高了 4.51% ~ 5.52%、11.23% ~ 15.22%、21.54% ~ 28.02%,其中 T4 ~ T6 处理小麦带与玉米带的下扎度相较 T3 处理小麦带与玉米带分别提升了 4.28% ~ 7.11%、10.52% ~ 13.40%、20.32% ~ 27.35% 和 4.67% ~ 4.70%、11.70% ~ 16.87%、22.56% ~ 28.78%。根系的聚拢程度方面,T4 ~ T6 处理的小麦带与玉米带的聚拢度相较 T3 处理的小麦带与玉米带分别提升了 7.54% ~ 16.58%、12.97% ~ 22.19%、20.78% ~ 28.28% 和 1.27% ~ 4.30%、5.42% ~ 6.66%、7.89% ~ 8.66%。可见,水分的亏缺程度直接影响间作群体根系的空间分布,随水分胁迫的加剧,间作群体两作物根系混合程度下降,根系向自己根区聚集并下扎的趋势增加。

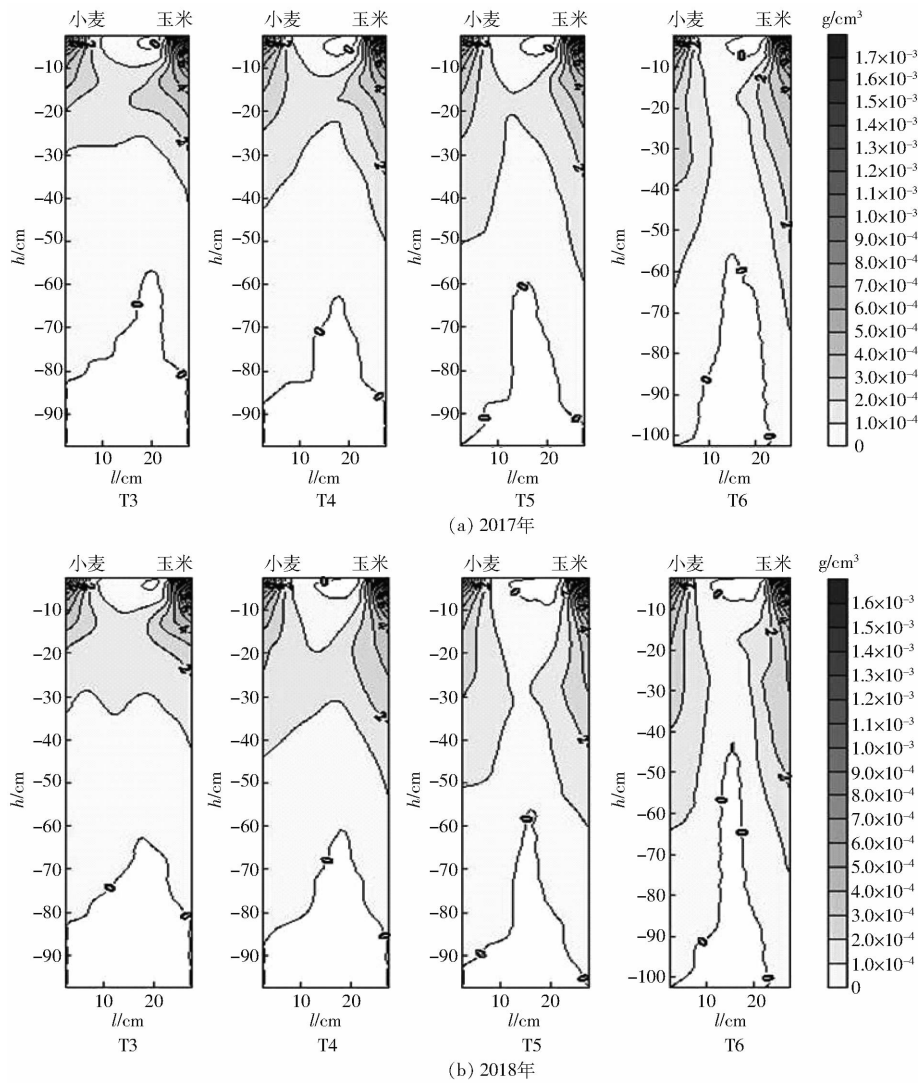


图 4 不同处理根系质量密度二维分布图

Fig. 4 Two dimensional distribution diagrams of root weight density with different treatments

2.3 间作优势与种间相对竞争能力

间作群体根系的错位分布有利于促进作物对土壤水分的充分利用。由表 4 可知,非胁迫(T3)下的间作群体其土地当量比(LER)均高于 1,分别达到了 1.21 ~ 1.24,其相对于同等面积单作时的产量增加 2 049 ~ 2 260 kg/hm²,增产 32.66% ~ 35.73%,说明间作优势明显。轻度的水分胁迫处理(T4)非但未降低间作群体的土地当量比,反而小幅提升了间作群体的土地当量比,相应的其相对于同等面积单作加权平均产量增加了 2 276 ~ 2 393 kg/hm²,较非水分胁迫下 T3 处理增产增加了 133 ~ 227 kg/hm²,说明间作群体能够应对轻度的干旱缺水情况而不造成间作优势降低,具有一定的抵抗水分胁迫逆境的能力。随着水分胁迫的加剧(T5),间作群体的土地当量比开始快速下降,由原来的 1.21 ~ 1.24 下降到 1.04 ~ 1.07,下降了 13.71% ~ 14.05%,较非胁迫处理(T3)的增产量下降了 1 434 ~ 1 477 kg/hm²,下降幅度达 65.35% ~ 69.98%,但仍存在间作优势。

当水分胁迫达到田间持水率的 70% 时(T6),间作优势彻底消失,间作群体的土地当量比变为 0.84 ~ 0.85,其相对于同等面积单作时的产量增加量变为 -874 ~ -838 kg/hm²。可见,要想当地小麦/玉米间作群体存在间作优势,每水最少要满足间作群体 80% 左右的田间持水率。此外,通过对表 4 中间作群体的偏土地当量比分析还可得出,随着水分胁迫程度的增大,间作群体内小麦与玉米的偏土地当量比均在明显下降,但玉米的偏土地当量比(P_{LERm})下降速率快于小麦(P_{LERw}),这也从侧面印证了间作群体内部随水分胁迫增加导致间作小麦对水分的捕获能力增强,减少了间作玉米应获得的水量,从而加快了间作玉米的偏土地当量比下降速率。由表 4 还可看出,不同间作处理内小麦的相对竞争能力均弱于玉米,随着水分胁迫的加剧,间作群体的种间相对竞争能力在小幅上升后逐渐减小(A_{wm} 的绝对值逐渐趋向于 0),这间接证明了随着水分胁迫的逐渐提升,间作群体根系在不断下扎吸水过程中群体内部两作

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)			<i>P</i> _{LERw}	<i>P</i> _{LERm}	LER	增产量/ (kg·hm ⁻²)	<i>A</i> _{wm}
		小麦	玉米	总产量					
2017	T1	3 964 ± 112		3 964 ± 112					
	T2		9 362 ± 257	9 362 ± 257					
	T3	2 220 ± 132	6 366 ± 162	8 586 ± 147	0.56 ± 0.02	0.68 ± 0.01	(1.24 ± 0.02) ^a	2 260 ± 78	-0.559 ± 0.026
	T4	2 259 ± 108	6 460 ± 247	8 719 ± 178	0.57 ± 0.01	0.69 ± 0.01	(1.26 ± 0.02) ^a	2 393 ± 106	-0.564 ± 0.014
	T5	2 147 ± 85	4 962 ± 182	7 109 ± 134	0.54 ± 0.02	0.53 ± 0.02	(1.07 ± 0.02) ^b	783 ± 53	-0.249 ± 0.009
	T6	1 724 ± 96	3 764 ± 106	5 488 ± 101	0.44 ± 0.02	0.40 ± 0.01	(0.84 ± 0.01) ^c	-838 ± 28	-0.146 ± 0.013
2018	T1	3 826 ± 118		3 826 ± 118					
	T2		9 425 ± 324	9 425 ± 324					
	T3	2 104 ± 137	6 221 ± 217	8 325 ± 177	0.55 ± 0.01	0.66 ± 0.02	(1.21 ± 0.02) ^a	2 049 ± 101	-0.531 ± 0.034
	T4	2 143 ± 149	6 409 ± 259	8 552 ± 204	0.56 ± 0.02	0.68 ± 0.02	(1.24 ± 0.02) ^a	2 276 ± 84	-0.559 ± 0.025
	T5	1 990 ± 76	4 901 ± 148	6 891 ± 112	0.52 ± 0.02	0.52 ± 0.01	(1.04 ± 0.01) ^b	615 ± 69	-0.264 ± 0.012
	T6	1 774 ± 89	3 628 ± 119	5 402 ± 154	0.46 ± 0.01	0.39 ± 0.01	(0.85 ± 0.01) ^c	-874 ± 32	-0.056 ± 0.003

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。

物根系间的交叉叠加范围在不断减小,进而降低了小麦相对于玉米对自然资源的竞争能力。

3 讨论

3.1 不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体水分利用特征

水分是农作物生长发育不可或缺的自然资源,也是养分输送的载体。因此,研究有限水资源在作物间的分配对于间作群体很重要,对于自然生态环境也同样重要。鉴于农业的高耗水性,以及未来水资源供需矛盾、粮食安全压力及气候变化等现实问题,对作物生产环节如何应对不利环境以保证粮食产量进行深入研究具有重要的现实意义。因此,在未来农业用水量零增长或负增长的前提下确保粮食产量平稳增加,需要提升水资源利用效率,使每一滴水生产出更多的粮食来保障中国的水资源和粮食安全。近年来,提高水资源利用效率已成为间作研究的重中之重,许多学者从品种配置^[6,10,17,20-21]、模式组合^[1-2]、互补竞争^[3,9,11,18,21]等多角度进行了优化水资源利用效率的理论与实践探索,为间作模式的推广提供了坚实基础。有研究表明,间作相较于单作对水分的需求量没有增加,但却提高了作物的水分利用率^[22-24]。关于间作是否提高水分利用效率,现有研究结论也并不一致。有研究认为,由于间作群体对光、热、水、肥等自然资源的竞争,导致间作群体水分利用效率和产量降低^[25]。目前国内外有关间作研究较多,但关于间作水分分配与吸收的研究报道却较少。在间作模式下,确定作物共生期内每种作物的耗水量十分困难,这也是间作群体中量化分析水分利用特征所面临的一个主要问题。因此,本研究从土壤水分角度入手,进行间作群体水分高

效利用机理方面的研究,得出水分胁迫会促使共生期内低含水率的作物条带获得高于应灌水量的灌溉水,且随水分胁迫的增加此规律愈发明显的结论。这一方面可能是由于灌水时有限的水量会优先供给根系分布较浅的小麦,小麦根系分布较浅有利于利用灌溉水资源,且间作小麦耕层含水率在共生期低于间作下的玉米,增大了小麦条带对灌溉水的入渗能力^[26-27],并由于小麦根系细胞液浓度较土壤溶液浓度差值更大,有利于小麦对土壤水分的捕获能力,使间作下需水量较大的玉米获得的水量进一步减少,使玉米根系为吸水而进一步下扎,从而获得了更多的水分和养分,进而造成种间相对竞争能力明显下降,使有限资源的互补利用孕育着产量优势的形成。另一方面可能由于间作群体增加了水分对作物的有效性与转化效率,提高了收获指数。此外,共生期内间作群体两作物间存在着土壤水分的互补利用^[11,18],也进一步改善了间作群体土壤水分的供应状况,提高了间作群体的水分利用效率。另外,间作群体改变了下垫面条件,降低风速进而减少蒸腾蒸发量,且间作群体中的高秆作物玉米对矮秆作物小麦的遮阴作用也会降低小麦条带表层土壤水分的散失。由此可见,间作群体实质上就是通过合理组合不同生态位作物,在时间与空间上集约利用水、肥、光热等资源,从而增加土壤水分生产力,提高资源利用效率。

3.2 不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体根系分布特征

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^[18]。间作群体不同作物根系分布特征对于作物水分竞争及利用效率起关键作用,水分利用

效率又间接影响了作物的生长及产量的形成^[28-30]。掌握间作群体响应水分胁迫的根系分布特征对于明确作物间水分竞争机理,提高间作农田水分高效利用具有重要意义。作物根系生长受基因控制,但根系的最终分布受土壤水分、养分等环境因子的影响^[31]。有学者通过对玉米/豇豆间作群体的研究认为,水分充足条件下,间作群体根系分布于大部分土体中,根系分枝与混合程度很大;水分胁迫条件下,限制了两种作物根系的侧向生长与混合程度,根系有向自己根区聚集的趋势,且水分竞争激烈会降低根系生长活力,促使根系向外生长;极度干旱条件下,间作群体根系可能根本不会混合^[32]。还有学者研究不同环境下的间作群体时,在土壤含水率较低与高酸性土条件下发现了间作群体根系竞争的失败^[33]。大量研究表明土壤水分吸收利用主要依赖于根系的空间分布^[29],但大多数有关间作群体根系对水分分配的研究都忽略了这一点,且根系生长对水分分配很敏感,若能结合不同水环境下间作群体的水分分配规律建立间作群体生长模式,这对间作作物对水分、肥料等资源的分配及间作群体的可持续发展会有很大帮助,也能更好地阐明水分在间作模式下土壤中的运动规律。因此,本研究设置了间作模式下的 4 个不同水分处理及 2 个单作模式下的非水分胁迫处理作为对照。通过研究发现,不同的水分胁迫处理对间作群体的根系下扎深度、下扎程度、平均分布深度、水平扩散距离、聚拢程度、交叉范围及程度等均有不同程度的影响,可为建立不同水环境下的间作群体根系生长模式奠定一定的数据基础。通过本试验还可得出,一定程度的水分胁迫可通过间作群体两作物根系的下扎吸水来满足作物水分需求,相应的根系生长又增加了根系吸水的深度,但过度的水分胁迫无法通过下扎吸水来满足作物对水分需求。此观点与李仙岳等^[8]相同,但与 HUANG 等^[34]相反。此外,在不同水分胁迫下小麦/玉米这种间作生物篱中,关于根系分布不同对作物肥料利用率及作物生长发育等方面的影响,以及对土壤盐分与地下水中可溶性盐离子等方面的相关研究还需要进一步深入探讨。

3.3 不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体产量效应评价

间作群体通过科学地运用不同习性作物间的组合,实现了增产和经济效益最大化的有机统一,对解决我国粮食安全及水资源短缺等问题具有实际意义。如何进一步提高间作在资源吸收利用效率的作用,适应干旱频发的气候环境日益为人们所关注。大量研究表明,间作模式具有明显的产量优势,能提高资源利用效率^[35-37],如小麦/玉米^[4-5,7,11-14,24]、

玉米/花生^[6]、玉米/番茄^[8]、蚕豆/玉米^[10]、大麦/玉米^[15]、小麦/向日葵^[18]等,但研究多基于间作群体相对单作的土地当量比^[6,11-12,15,18,20,35]或是间作群体的水分利用效率^[3,9-10,21,36-37]等,对于间作群体应对干旱胁迫逆境的响应机理研究甚少。因此,本研究以此为出发点进行了深入研究。通过研究发现,水分胁迫对间作玉米的土地当量比影响更大,且轻度的水分胁迫不会降低河套灌区小麦/玉米间作群体的间作优势,反而存在轻微的提升作用,其产生的原因可能为轻度的水分胁迫促进了间作群体根系的进一步伸展,吸收了更多的养分,奠定了高产的潜力。其次,可能由于水分胁迫增加了植物体茎、叶光合产物向籽粒的转移,进而提升了间作优势。但过多的胁迫会降低间作优势,甚至出现间作劣势,因此控制好水分胁迫的程度对于河套灌区小麦/玉米间作群体的节水增产十分重要。

此外,需要指出的是,间作群体中某一作物相对于另一作物的竞争能力直接以产量计算得出过于片面,间作群体的相对竞争能力是随着生育期的推进不断变化的,单纯以产量直接界定其竞争能力不够科学。通过本试验可知,以产量得出的小麦竞争能力弱于玉米,而以水分的捕获当量比及水分的相对竞争能力看,则小麦竞争能力强于玉米。种间相对竞争能力是衡量间作群体两种作物中一种作物相对于另一种作物对水、热、光能、肥料等资源竞争能力,要以共生期内两作物对各种资源竞争能力来综合衡量,而产量指标是间作群体生命过程的最终体现,未考虑到小麦收获后玉米的反弹效应带来的产量增加,难以精确揭示间作群体在两作物共生期内实际的相关关系的动态变化,因而以这些指标做出的结论难以准确、系统地为间作群体制定科学合理的灌溉制度提供理论依据,种间相对竞争能力更应通过共生期内不同作物条带对各种资源的竞争能力来综合评判。

4 结论

- (1) 间作处理下普遍存在小麦条带水分捕获当量比高于玉米条带水分捕获当量比的现象,且随水分胁迫的加剧,小麦条带的水分捕获当量比逐渐增加,玉米条带的水分捕获当量比则相反。随着生育期的推进,还表现出小麦条带水分捕获当量比逐渐减小,玉米条带水分捕获当量比逐渐升高,且两作物条带间的水分相对竞争能力逐渐下降的规律。
- (2) 充分灌溉下间作群体平均根系分布深度为 17.15 ~ 17.24 cm,其根质量密度的 90.42% ~ 90.77% 分布于耕层内,其中小麦为 87.49% ~

88.70%,玉米为 92.63% ~ 92.81%。水分的亏缺程度直接影响间作群体根系的空间分布,随水分胁迫的加剧,间作群体两作物根系混合程度下降,根系向自己根区聚集并下扎的趋势增大。

(3)河套灌区小麦/玉米间作群体保有间作优势每次灌水最少需满足 80% 左右的田间持水率,随水分胁迫程度的增加,间作群体土地当量比呈现先微升、后逐渐下降的规律,且间作玉米的偏土地当量比下降速率快于间作小麦。在种间相对竞争能力方面,表现出随水分胁迫的加剧间作小麦相对于间作玉米种间相对竞争能力先微升、后快速下降、并逐渐

近于消失的趋势。

(4)间作群体的特殊性造成了两作物条带存在时间与空间上的土壤水分差异,进而导致灌溉水入渗速度及入渗总量的不同,而水分胁迫增大了这种趋势,这在一定程度上满足了灌溉水的最佳去处,从而提高了间作群体的水分利用效率,提升了间作群体应对不利环境的韧性,揭示了间作群体的节水增产机理。

(5)间作群体种间相对竞争能力通过共生期内不同作物条带对各种资源的竞争能力来综合评判更为科学。

参 考 文 献

- [1] 许迪, 龚时宏, 李益农, 等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 631 - 639.
XU Di, GONG Shihong, LI Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631 - 639. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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.
- [5] 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 indry areas[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 44 - 53.
- [6] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3702 - 3713.
GAO Yanliang, SUN Zhanxiang, BAI Wei, et al. Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(19): 3702 - 3713. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [9] 刘浩. 间作条件下作物根系吸水规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
LIU Hao. Study on water uptake by plant roots in intercropping patterns [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006. (in Chinese)
- [10] 叶优良, 肖焱波, 黄玉芳, 等. 小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对水分利用的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 445 - 449.
YE Youliang, XIAO Yanbo, HUANG Yufang, et al. Effect of wheat/maize and bean/maize intercropping on water use[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(3): 445 - 449. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 李来祥, 刘广才, 李隆. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献研究[J]. 干旱地区研究, 2008, 26(1): 74 - 80.
LI Laixiang, LIU Guangcai, LI Long. Intercropping advantage and contribution of above-ground and under-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 74 - 80. (in Chinese)
- [13] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 间作模式下冬小麦与春玉米根系的时空分布规律[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1242 - 1246.
LIU Hao, DUAN Aiwang, SUN Jingsheng, et al. Spatial temporal distribution patterns of winter wheat and spring maize root systems under intercropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1242 - 1246. (in Chinese)

- [14] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间套农田水、肥与根系的时空协调性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 53 – 56.
HUANG Gaobao, ZHANG Enhe. Coordinating of root-water-fertilizer relation of spring wheat-spring corn intercropping system under regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 53 – 56. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] VANDERMEER J. The ecology of intercropping[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 1 – 28.
- [17] ZHANG L Z, VANDER W W, ZHANG S P, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2007, 103: 178 – 188.
- [18] 张作为, 史海滨, 刘德平, 等. 小麦/向日葵间作群体水盐运移机理及种间竞争能力研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 243 – 251.
ZHANG Zuwei, SHI Haibin, LIU Deping, et al. Water and salt migration mechanism and competitive ability in wheat sunflower intercropping system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 243 – 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180329&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.029. (in Chinese)
- [19] WILLEY R W, RAO M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(2): 117 – 125.
- [20] 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.
DONG Wanlin, ZHANG Lizhen, YU Yang, et al. Productivity and water use in sunflower intercropped with potato[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 127 – 133. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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.
- [23] GAISER T, BARROS I D, LANGE F M. 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.
- [24] CHAI Q, YANG C H, HUANG G B. Water use characteristics of alternately irrigated wheat/maize intercropping in Oasis region of northwestern China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1623 – 1630.
- [25] 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, 2006, 95(2 – 3): 280 – 290.
- [26] BORGESEN C D, JACOBSEN O H, HANSEN S, et al. Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1 – 4): 40 – 50.
- [27] RIPOCHE A, CELETTE F, CINNA J P, et al. Design of intercrop management plans to fulfill production and environmental objectives in vineyards[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 32(1): 30 – 39.
- [28] CALDWELL R M, RICHARDS J H. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots[J]. Oecologia, 1989, 79: 1 – 5.
- [29] HORTON J L, HART S C. Hydraulic lift: a potentially important ecosystem process[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1998, 13(6): 232 – 235.
- [30] SHEN Y F, ZHANG Y, LI S Q. Nutrient effects on diurnal variation and magnitude of hydraulic lift in winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1589 – 1594.
- [31] SMUCKER A M J, AIKEN R M. Dynamic root responses to water deficits[J]. Soil Science, 1992, 154: 281 – 289.
- [32] ADIKU S G K, OZIER L H, BAJAZER T, et al. Patterns of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse conditions[J]. Plant and Soil, 2001, 235(1): 85 – 94.
- [33] ONG C K. Alley cropping-ecological pie in the sky[J]. Agroforestry Today, 1994, 6(3): 8 – 10.
- [34] HUANG B, FRY J D. Root anatomical, physiological and morphological responses to drought stress for tall fescue cultivars [J]. Turfgrass Science, 1998, 38(4): 1017 – 1022.
- [35] 苟芳, 张立祯, 董宛麟, 等. 农牧交错带不同间套作模式的土地生产力[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 129 – 141.
GOU Fang, ZHANG Lizhen, DONG Wanlin, et al. Productivity of strip intercropping systems in agro-pastoral ecotone[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 129 – 141. (in Chinese)
- [36] 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)
- [37] 张凤云, 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)