文章编号:1000-7601(2016)04-0031-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.04.06

不同生育时期非充分灌溉对间作作物产量构成因子及收获指数的影响

张作为[1],史海滨[1],李　祯[1],李仙岳[1],闫建文[1],李介均[2]

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;2.磴口县水务局,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘　要:针对内蒙古河套灌区干旱缺水的实际情况,以春小麦间作玉米、春小麦间作向日葵复合群体为研究对象,以不同生育期的非充分灌溉为试验处理,进行间作模式下的非充分灌溉试验。结果表明:间作下小麦分蘖期每多灌溉 15 mm 有效分蘖数提高 5.4% ~ 15.07%,而乳熟期随着水分胁迫加剧间作模式下的小麦穗粒数、千粒重、产量均呈现出先升高后降低的规律。对于间作下的玉米产量构成,适当减少小麦分蘖与拔节期的灌水量,相应增加小麦乳熟与玉米灌浆吐丝期的灌水量,有利于大幅提高缺水地区间作模式下的玉米产量,且随着灌水总量的升高,穗粒数以 1.27 ~ 2.47 粒·mm^{-1}的速度递增,产量以 62.24,94.93,29.73 kg·hm^{-2}·mm^{-1}的"S"型曲线逐渐升高。而对于间作下的向日葵产量构成,其主要受小麦乳熟期与向日葵现蕾期水分处理的影响,且随灌水总量的提高间作向日葵的单株粒数呈先升后降的规律,而百粒重和产量则呈"N"型和"M"型规律变化。对于不同水分处理下各间作作物对水分的敏感指数表现为小麦的敏感指数最高,玉米次之,向日葵最低。不同水分处理对各间作作物收获指数的影响表现为间作模式下的小麦受水分胁迫后其收获指数普遍提高,间作模式下玉米的收获指数随灌水总量上升而逐渐上升,而间作模式下受水分胁迫处理的向日葵收获指数反而下降。

关键词:非充分灌溉;间作;产量构成因子;水分敏感指数;收获指数

中图分类号:S274　　**文献标志码**:A

The influence of deficit irrigation during different growth periods on the yield components and harvest index of intercropped crops

ZHANG Zuo-wei[1], SHI Hai-bin[1], LI Zhen[1], LI Xian-yue[1], YAN Jian-wen[1], LI Jie-jun[2]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010018, *China*; 2. *Dengkou Water Affairs Bureau*, *Dengkou County*, *Bayannaoer*, *Inner Mongolia* 015000, *China*)

Abstract: In consideration of the drought and water shortage in Inner Mongolia Hetao irrigation district, deficit irrigation experiments which took the spring wheat/maize and spring wheat/sunflower intercropping systems as the research object during different crop growth periods were conducted. The results showed that the effective tiller number was increased by 5.4% ~ 15.07% with 15 mm increase in irrigation at wheat tillering stage, whereas the grains per spike, 1000-grain weight and yield were increased first and then became decreased at the wheat milk stage under the aggravation of the water stress. As for the yield component of maize in the intercropping mode, decreasing the irrigation amount at wheat tillering and jointing stages and increasing the irrigation amount at wheat milk stage and maize grouting silking stage were beneficial to increasing the maize yield substantially in water-deficient district. In addition, with the increase of total irrigation amount, the grains per spike was increased with a rate of 1.27 ~ 2.47 grain·mm^{-1}, and the maize yields were increased gradually as 62.24, 94.93 kg·mm^{-1}, and 29.73 kg·mm^{-1} in a pattern of "S" rate curve. However, the yield component of sunflower in the intercropping mode was mainly influenced by water treatments at wheat milk stage and sunflower budding stage. Furthermore, the grains per sunflower spike were increased at the beginning and then became decreased with the increase of irrigation amount, whereas the 100 - seed - weight and sunflower yield were in N - shape

收稿日期:2015-06-12
基金项目:国家科技支撑计划(2011BAD29B03);国家自然科学基金项目(51269015);内蒙古自治区科技创新团队
作者简介:张作为(1985—),男,吉林桦甸人,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail:zhang-zuowei6@163.com。
通信作者:史海滨(1961—),男,山西太谷人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail:shi_haibin@sohu.com。

and M – shape curves, respectively. Under different irrigation treatments, as for the water sensitivity index of intercropping crops, that of wheat was the highest, that of sunflower was the lowest, and that of maize was in the middle. As for the harvest index of intercropping crops under the aggravation of water stress, that of wheat was increased generally, that of maize was increased with the increase of total irrigation amount, whereas that of sunflower was decreased.

Keywords: deficit irrigation; intercropping crops; yield components; water sensitivity index; harvest index

水资源短缺已经成为中国北方干旱半干旱地区农业发展的首要限制因素[1-2],因此,发展和建立高效的节水农业,优化当地的灌溉制度已经成为这些地区的必然选择。目前,该方面的研究多集中在研究不同水分胁迫对作物株高、叶面积、干物质量、产量等的影响方面[3-6],而不同生育期作物对水分胁迫的敏感性及其对产量构成因子等更深层次的影响研究较少[7-8],特别是对干旱半干旱地区盐渍化土壤上的间作模式研究就更少。且前人的研究多在盆中或土培池中进行[9-10],这与大田的实际环境条件差异较大,因而在大田条件下研究不同生育时期的非充分灌溉对间作作物产量构成因子及其收获指数的影响,就显得尤为重要。本试验以干旱半干旱下的内蒙古河套灌区盐渍化地区面临指令性节水20%的要求为研究背景,以当地大面积采用的间作种植模式下的小麦、玉米、向日葵为研究对象,旨在揭示不同生育期不同水分处理对当地间作下的小麦、玉米、向日葵三种作物产量构成因子的影响,为北方干旱及缺水地区的节水农业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年在内蒙古河套灌区磴口县卜隆乡坝楞村节水示范区(40°24′32″N,107°02′19″E)进行,试验区平均海拔 1 072 m,年均降雨量 142.8 mm,蒸发量 2 384.7 mm,受下垫面影响,地表基本无径流,属干旱半干旱地区。年均日照时数 3 208.7 h,能满足作物的生长需求。根据当地多年气象观测资料显示,该地最高气温 37.4℃,最低气温 – 33.1℃,多年平均气温 7.1℃。试验地土壤质地为壤土,密度较为均一,平均为 1.49 $g\cdot cm^{-3}$。田间持水量为 23.28%,凋萎系数为 11.24%,耕层土壤含盐量约为 1.08 $g\cdot kg^{-1}$,有机质含量约为 10.0 $g\cdot kg^{-1}$。

1.2 试验材料

试验材料均采用当地农民普遍种植的品种:小麦为永良四号, 玉米为西蒙 6 号,向日葵为 T9938。

1.3 试验设计

由于小麦孕穗期与拔节期对水分最敏感,而玉米与向日葵则分别为抽雄吐丝期与现蕾期,故试验以尽量满足小麦拔节期与孕穗期、玉米抽雄吐丝期、向日葵现蕾期需水量为宗旨,针对不同间作模式下作物的不同生育期设置了 3 个灌水水平,分别为 67、82、97 mm,选择在小麦分蘖期、小麦拔节期、小麦孕穗期、小麦乳熟期、玉米灌浆/葵花现蕾期 5 个生育期进行不同的灌水处理,3 个单作充分灌溉为对照处理(见表 1)。各小区面积为 9 × 8 = 72 m^2,采用随机区组设计,每处理 3 次重复。播种时小麦、玉米施纯氮 100 $kg\cdot hm^{-2}$,P_2O_5 160 $kg\cdot hm^{-2}$,向日葵施纯氮 67.5 $kg\cdot hm^{-2}$,P_2O_5 110 $kg\cdot hm^{-2}$作底肥,小麦拔节期追施尿素 125 $kg\cdot hm^{-2}$,玉米喇叭口期和抽雄吐丝期分别追施尿素 225 $kg\cdot hm^{-2}$和 75 $kg\cdot hm^{-2}$,向日葵在现蕾 ~ 开花期追施尿素 150 $kg\cdot hm^{-2}$。小麦、玉米、向日葵的播种时间分别为 3 月 19 日、4 月 22 日、5 月 23 日,收获时间分别为 7 月 16 日、9 月 15 日、9 月 14 日。小麦采用机械播种,统一播量,玉米、向日葵采用人工精细播种。小麦收获后在两作物间打埂,采用单灌玉米和向日葵的方式灌溉,且各小区间埋有 1 m 深的防水塑料膜。间作模式下的两作物种植条带宽度均为 2 m,每小区种植两条小麦带两条玉米/向日葵带,其布置为“小麦 – 玉米/向日葵 – 小麦 – 玉米/向日葵”,每一小麦带播种 18 行小麦,行距 11 cm。间作玉米采用宽行密植,大行距 90 cm,小行距 40 cm,株距为 25 cm,玉米带种植两膜 4 行玉米,边距小麦带 20 cm。单作玉米行距与间作相同,株距为 30 cm。间作向日葵采用宽窄行种植,宽行距 90 cm,窄行距 40 cm,株距 45 cm,向日葵带种植两膜 4 行向日葵,边距小麦带 20 cm。单作向日葵行距与间作相同,株距 50 cm。小麦/玉米间作的共生期为 86 d,小麦/向日葵间作的共生期为 55 d。单作下的充分灌溉灌水定额为 97 mm,栽培管理措施按常规高产田实施。

1.4 观测项目与方法

1.4.1 气象资料观测 利用设置于田间的农田微型气象站(HOBO 型,美国)自动观测各作物整个生育期内逐日的降雨量、温度、风速、太阳辐射、大气压强、蒸腾蒸发量、露点温度等气象资料,测定时间间隔为 1 h。降雨量见图 1。

表 1　各处理不同生育期灌水量/mm

Table 1　The irrigation quantity at different growth stages by all treatments

处理 Treatment	小麦分蘖期 Tillering	小麦拔节期 Jointing	小麦孕穗期 Booting	小麦乳熟期 Milking	玉米抽雄吐丝/向日葵现蕾期 Tasseling and silking/squaring	灌水总量 Total
CKW	97	97	97	97	0	388
CKM	0	0	97	97	97	291
CKS	0	0	97	97	97	291
WM－1/WS－1	82	82	82	82	41	369
WM－2/WS－2	67	82	82	67	41	339
WM－3/WS－3	67	97	97	67	49	377
WM－4/WS－4	82	97	97	82	49	407
WM－5/WS－5	97	97	97	97	49	437

注:CKW—小麦单作;CKM—玉米单作;CKS—向日葵单作;WM—小麦间作玉米;WS—小麦间作向日葵。下同。

Note: CKW — wheat alone; CKM — maize alone; CKS — sunflower alone; WM — wheat intercropped with maize; WS — wheat intercropped with sunflower. The same below.

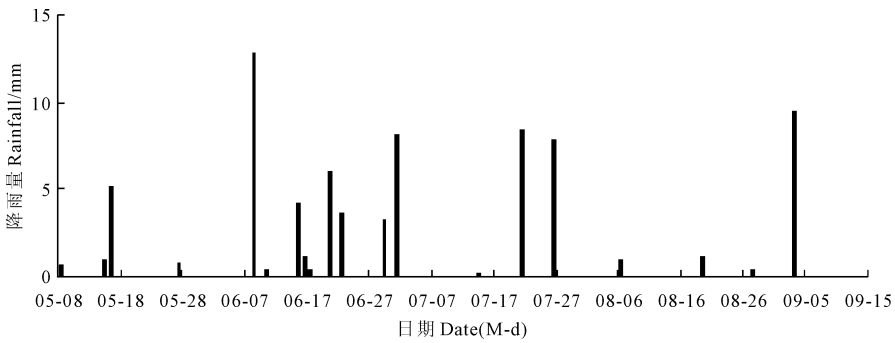

图 1　各作物全生育期降雨量

Fig.1　Rainfall during whole growth period of different crops

1.4.2　播种　采用精细播种、统一播量,因此各小区出苗均匀、一致,基本苗基本稳定。

1.4.3　灌水量测定　灌溉水来源于黄河水,通过各级渠道流至试验田附近的毛渠,再由精度为 0.01 m^3 的水泵抽水并对各小区进行灌溉。

1.4.4　作物产量构成因子的测定　小麦:收获时每小区沿对角线取 3 个 1 m^2 的典型样本,收获晾晒后,计算每平方米小麦的株数、穗粒数、千粒重及产量,并折成平均单位面积(hm^2)产量。玉米:于收获风干后进行室内考种测产,分别计算并测量单位面积株数及产量、穗粒数、百粒重。向日葵:于成熟期在每小区沿对角线选取 10 株测产,主要测量盘粒数、百粒重,并计算单位面积上的株数、产量。

1.4.5　干物质量测定　于成熟期每小区选取长势一致的小麦 20 株,玉米、向日葵各 5 株,置于烘箱内 105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重并称量,计算单株作物的干物质量。

1.5　数据处理

用 Microsoft Excel 2003 进行数据计算与图表制作,用 Spss17.0 软件进行差异显著性检验(LSD 法)。

2　结果与分析

2.1　不同水分处理对间作模式下各作物产量构成因子的影响

2.1.1　不同水分处理对间作模式下小麦产量构成因素的影响　不同生育期的不同灌水处理会对间作模式下的小麦产量构成因子产生显著影响。

各处理单位面积小麦株数与对照均存在 0.05 水平上的显著差异,且表现为随小麦分蘖期灌水量增加而逐渐上升的趋势(表 2)。由 WM－5、WS－5 和 CKW 处理还可看出相同灌水总量的情况下,间作模式比单作模式成穗率高。各处理小麦穗粒数普遍高于对照(WS－3、WM－4、WM－5 除外),其中 WM－3 处理最高,达每穗 37.9 粒,WM－1 处理次之,分别较对照(CKW)高 33.45%、27.11%,而 WM－5 处理最差,较对照(CKW)下降了 11.62%。对于小麦的千粒重,WM－3 /WS－3 处理无论间作作物是玉米还是向日葵小麦的千粒重均高于对照(CKW),而

WM－1/WS－1、WM－2/WS－2、WM－5/WS－5处理则出现间作玉米模式下的小麦千粒重普遍高于对照(CKW)4.42%～14.23%,间作向日葵种植模式下的小麦千粒重普遍低于对照(CKW)4.22%～21.46%的规律,但相同灌水处理下的WM－4与WS－4处理则与此相反。对于间作模式下的小麦产量表现为间作玉米模式下的WM－2处理产量最高,比对照(CKW)提高了13.76%,且差异显著($P<0.05$),间作向日葵模式下的WS－4处理最优,与对照(CKW)相比提高了10.17%,也存在显著性差异($P<0.05$),WM－1/WS－1处理的产量也高于对照且存在0.05水平上的显著性,其余各处理的产量均低于对照且差异显著($P<0.05$)。说明对不同间作模式下的小麦进行适当的水分胁迫处理有利于产量的提高。

表2 不同水分处理对间作模式下小麦产量构成因子的影响

Table 2 Effects of different moisture treatments on wheat yield components in the intercropping system

处理 Treatment	单位面积株数 Stock number per unit area /(万株·hm^{-2})	穗粒数 Grains per spike /粒	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
CKW	662c	28.4e	40.07e	5013d
WM－1	605d	36.1ab	44.82b	5333c
WS－1	584d	34.1c	38.38f	5373c
WM－2	598d	30.7d	45.77a	5703a
WS－2	607d	30.6d	34.89g	4582fg
WM－3	707b	37.9a	41.92d	4742e
WS－3	592d	27.9e	40.58e	4612f
WM－4	699b	27.3e	40.05e	4322h
WS－4	759a	34.2c	43.38c	5523b
WM－5	750a	25.1f	41.84d	4622ef
WS－5	773a	34.9bc	31.47h	4462g

注:数据后不同小写字母表示在$P=0.05$水平下差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant at 0.05 level. Hereinafter.

2.1.2 不同水分处理对间作模式下玉米产量构成因素的影响 在玉米生长发育过程中,对水分胁迫的响应因生育期不同而有较大差异。即在玉米不同生育阶段发生的水分胁迫对最终产量的影响程度不同,也就是说玉米产量的下降不仅取决于水分胁迫的程度,也取决于玉米所处的生育阶段[11]。

间作模式下的玉米单位面积株数各间作处理间无差异,只与单作下的充分灌溉处理(CKM)存在显著性差异(表3)。各间作处理玉米单株穗粒数呈现随灌水总量增加逐渐上升的规律,且差异显著,说明试验设计灌水量与间作模式下的玉米需水量间存在较大差距,过少的灌水量严重影响了玉米的正常生长,以致玉米植株体本身不能通过自身的调节来消除灌水量过少带来的影响。各间作处理玉米百粒重随灌水量增加呈现先升高后降低的趋势,WM－4处理达到最高值37.21 g,比单作下的充分灌溉(CKM)提高了12.72%,说明一定程度的水分胁迫有利于提高玉米的百粒重。各间作处理的玉米单位面积产量也表现出随灌水总量增加而上升的趋势,这说明单作模式下的灌水定额满足不了间作下的玉米需水要求。

表3 不同水分处理对间作模式下玉米产量构成因子的影响

Table 3 Effects of different moisture treatments on maize yield components in the intercropping system

处理 Treatment	单位面积株数 Stock number per unit area /(万株·hm^{-2})	穗粒数 Grains per spike /粒	百粒重 100-seed weight /g	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
CKM	6.045b	670ab	33.01c	9897c
WM－1	6.753a	435e	26.96e	5305f
WM－2	6.753a	516d	28.72d	7024e
WM－3	6.753a	610c	32.43c	9389d
WM－4	6.753a	648bc	37.21a	12237b
WM－5	6.753a	697a	34.91b	13129a

2.1.3 不同水分处理对间作模式下向日葵产量构成因子的影响 间作下的向日葵播种于小麦孕穗期灌水前,小麦孕穗期的水分处理对于间作下处于刚出苗阶段的向日葵而言影响甚微,故本文主要从小麦乳熟期与向日葵现蕾期的水分胁迫处理对向日葵产量构成因子的影响来进行分析。

单种充分灌溉处理(CKS)下的向日葵虽不受水分的制约,但其各产量构成因子均非最大(表4),说明适当的水分胁迫对间作下的向日葵产量构成因子有提升作用。对于WS－1处理,除百粒重外均与对照(CKS)存在显著性差异($P<0.05$),产量比对照(CKS)下降了10.71%,处于各处理中的最低位,可见对各生育期进行相同的水分处理不能很好地满足间作向日葵的需水要求,造成产量大幅下降。WS－2处理的百粒重显著高于对照,产量则比对照(CKS)提高了11.96%,差异明显,说明适当的水分胁迫处理对间作模式下的向日葵产量有积极作用。对比WS－1与WS－2处理可知,两处理只在小麦乳熟期水分处理不同,WS－2处理受水分胁迫的程度比WS－1处理更严重,然而WS－2处理的产量反而比

表 4　不同水分处理对间作模式下向日葵产量构成因子的影响

Table 4　Effects of different moisture treatments on sunflower yield components in the intercropping system

处理 Treatment	单位面积株数 Stock number per unit area /(万株·hm^{-2})	单株粒数 Seed number /(粒·株$^{-1}$)	百粒重 100-seed weight /g	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
CKS	2.918b	1066b	17.42cd	3904c
WS－1	3.335a	966c	18.09c	3486d
WS－2	3.335a	905d	19.96ab	4371ab
WS－3	3.335a	1024b	20.82a	3853c
WS－4	3.335a	1126a	16.19d	4590a
WS－5	3.335a	966c	18.69bc	4120bc

WS－1 处理提高了 25.39%。说明对间作模式下处于苗期－快速生长期的向日葵采取中度水分胁迫,而对向日葵现蕾期采取轻度水分胁迫,间作模式下的向日葵产量反而会出现反弹效应,间接说明向日葵现蕾期是向日葵的水分敏感期,该生育期受水分胁迫会严重影响间作模式下向日葵的产量,这与单玉芬[12]等向日葵花序形成期受旱会严重影响产量的结论一致。对比 WS－3 与 WS－4 处理,均是在小麦乳熟期受水分胁迫,区别在于 WS－3 处理在小麦乳熟期受中度水分胁迫,而 WS－4 处理在小麦乳熟期受轻度水分胁迫,而产量却差异明显,说明在向日葵的苗期～快速生长期与现蕾期的水分胁迫处理不应过大,否则会严重影响向日葵的光合作用进而影响产量。WS－5 处理与对照(CKS)相比只有单株粒数出现了下降,且差异显著。说明 97 mm 的灌水定额对于小麦/向日葵间作模式下的向日葵产量不会造成显著影响。

2.2　不同水分处理下三种作物的相对灌水不足额及其对产量的影响

在水资源有限的情况下实际灌水量(I)应小于充分供水条件下的最大灌水量(I_m),同样在有限水资源条件下的实际产量(Y)也应小于充分供水条件下的最大产量(Y_m),用 $1-I/I_m$ 表示相对灌水不足额,即水分亏缺,用 $1-Y/Y_m$ 表示相对产量下降值,即相对减产率,两者之间存在着一定的关系:

$$1-Y/Y_m = K(1-I/I_m)$$

K 为产量对水分状况的敏感指数,K 值越大,说明水分对产量的影响越大,K 为负值则表明水分过多,其绝对值越大对产量的负效应越强。水分胁迫处理下各作物 K 值见表 5。

表 5　各处理产量对水分的敏感指数

Table 5　Yields by all treatments in accordance to water sensitivity index

处理 Treatment	灌水总量 Total of irrigation/mm	产量 Yield/(kg·hm^2)			产量对水分的敏感指数 K The water sensitivity index of yield		
		小麦 Wheat	玉米 Maize	向日葵 Sunflower	小麦 Wheat(Kw)	玉米 Maize(Km)	向日葵 Sunflower(Ks)
CKW	388	5013			1		
CKM	291		9897			1	
CKS	291			3904			1
WM－1	369	5333	5305		－1.30	－1.73	
WS－1	369	5373		3486	－1.47		－0.40
WM－2	339	5703	7024		－1.09	－1.76	
WS－2	339	4582		4371	0.68		0.73
WM－3	377	4742	9389		1.90	－0.17	
WS－3	377	4612		3853	2.82		－0.04
WM－4	407	4322	12237		－2.81	0.59	
WS－4	407	5523		4590	2.08		0.44
WM－5	437	4622	13129		－0.62	0.65	
WS－5	437	4462		4120	－0.87		0.11

注:以单种充分灌溉下的灌水量与产量为最大灌水量与最大产量,Kw、Km、Ks 分别为小麦、玉米、向日葵产量对水分状况的敏感指数。

Note: Under the condition of single cropping and full irrigation, the irrigation amount and yield were taken as the maximum irrigation amount and the maximum yield. The Kw, Km and Ks respectively are the sensitive indexes of crop yield to the water condition.

各水分处理间的水分敏感指数差异较大,相同水分处理下的两作物间 K 值均不同,且相同水分处理不同间作模式下的同种作物间其 K 值也不一样(表 5),表现为 Kw 的波动范围 > Km 的波动范围 > Ks 的波动范围,这说明小麦对水分的敏感程度最高,玉米次之,向日葵最低。且由表中可以看出 WM－3/WS－3 与 WM－4/WS－4 处理的 Kw 值或绝对值最大,说明这两个处理受水分影响最大,结合表 1

可知,在充分满足拔节期及孕穗期小麦需水量的情况下,分蘖期及乳熟期适度的水分胁迫也会对产量造成较大影响。而 WS－2 与 WM－5 处理的 *Kw* 值或绝对值最小,说明这两个处理的水分条件最接近于间作向日葵与玉米模式下小麦生长发育的最适水平。而 WM－1、WS－1、WM－2、WS－5 处理其 *Kw* 值均为负值,说明有些生育时期水分过多,结合表 1 可知,其灌水总量均不大,说明这几个处理的灌水情况与小麦的实际需水情况产生错位,不能很好地满足小麦需水要求而产生水资源浪费。从玉米产量对水分的敏感指数 *Km* 可以看出,随着灌水总量的提高 *Km* 值由负到正逐渐变大,且 WM－3 的 *Km* 的绝对值最小,说明总灌溉量 377 mm(67、97、97、67、49 mm)的水分处理最接近间作下的玉米需水规律。而对于向日葵产量对水分的敏感指数 *Ks* 而言,WS－3 处理的 *Ks* 值为－0.04,已经接近于零,说明该处理灌水情况非常接近于间作下的向日葵真实需水情况,能够高效利用有限的水资源。

2.3 不同水分处理对间作模式下各作物生物产量与收获指数的影响

收获指数是指作物收获时的经济产量(籽粒)与生物产量之比,又叫经济系数[13]。生物产量是指作物整个生育期间通过光合作用积累的有机物的总量,通常指地上部的总干物质重量[6]。本文中的生物产量是指作物地上部的总干物质重量,各处理不同作物的收获指数见表 6。

表 6 不同水分处理对间作模式下三种作物收获指数的影响

Table 6 Effects of different moisture treatments on harvest index of three crop species in the intercropping system

处理 Treatment	籽粒产量/(g·株$^{-1}$) Grain yield/(g·plant^{-1})			生物产量/(g·株$^{-1}$) Biomass/(g·plant^{-1})			收获指数 Harvest index		
	小麦 Wheat	玉米 Maize	向日葵 Sunflower	小麦 Wheat	玉米 Maize	向日葵 Sunflower	小麦 Wheat	玉米 Maize	向日葵 Sunflower
CKW	0.757			1.795			0.42		
CKM		214			438			0.49	
CKS			196			477			0.41
WM－1	0.881	124		2.072	300		0.43	0.41	
WS－1	0.920		165	1.978		489	0.46		0.34
WM－2	0.953	138		2.116	282		0.45	0.49	
WS－2	0.755		193	1.796		526	0.42		0.37
WM－3	0.670	186		1.648	357		0.41	0.52	
WS－3	0.779		189	1.614		534	0.48		0.35
WM－4	0.618	237		1.398	386		0.44	0.61	
WS－4	0.727		197	1.678		510	0.43		0.39
WM－5	0.616	239		1.511	339		0.41	0.70	
WS－5	0.577		212	1.376		630	0.42		0.34

不同的水分处理对各作物的收获指数影响不同,且相同水分处理不同间作模式下的同种作物间也差异明显(表 6)。由表还可得出玉米的收获指数最大,小麦次之,向日葵最小。且小麦的收获指数表现较稳定,与对照(CKW)相比,受水分胁迫后有利于提高间作模式下的小麦收获指数(WM－3 处理除外),这与 Plaut[14－15]等小麦生育后期受水分胁迫后会促进光合产物向籽粒中转移进而增加粒重的结论一致。而对于不同水分处理不同间作模式下的玉米收获指数而言(表 6),随着灌水总量的提高呈逐渐增加趋势,说明对于间作玉米生育期最高每水 97 mm 的灌水量来说,仍不能满足间作下的玉米需水要求。而对于向日葵的收获指数,表现为间作模式下受水分胁迫处理的向日葵收获指数均低于对照(CKS),这是因为对 WS－1 与 WS－2 处理而言,向日葵现蕾开花期是向日葵对水分的最敏感时期,受水分胁迫会影响籽粒灌浆,进而影响收获指数。WS－3 与 WS－4 处理则是由于小麦乳熟期向日葵正处于快速生长期,受水分胁迫会促使向日葵根系向土壤深层生长以汲取水分及养分,并减慢生长速度,在向日葵现蕾期充分灌水后,会先满足向日葵的营养生长,而不利于向日葵的生殖生长,导致其生物产量偏高,籽粒产量偏低,进而降低了向日葵的收获指数。而对于 WS－5 处理,则是由于生育期内水分供应充足,对向日葵的生长不产生抑制作用,不利于光合产物向籽粒中转移,虽然间作模式改善了通风透光条件,增加了籽粒产量,但其提高幅度没有生物产量的提高幅度大,反而降低了向日葵的收获指数。

3　讨　论

在间作作物的不同生育时期进行非充分灌溉,对于间作模式下的小麦产量构成而言,由于单位面积株数是影响产量高低的关键因素之一,且产量三因素(穗数、穗粒数、千粒重)对产量都有正向效应,其中穗数对产量的贡献最大[16-18],由试验可知分蘖期是决定小麦穗数的重要阶段,因此,小麦分蘖期灌水量与小麦分蘖数直接相关。在小麦分蘖与乳熟期受中度水分胁迫,在其余生育期不受胁迫,有利于提高间作玉米模式下的小麦穗粒数与穗粒重。总灌溉量 339 mm(67、82、82、67、41 mm)的处理有利于提高间作玉米模式下的小麦千粒重及产量。总灌溉量 407 mm(82、97、97、82、49 mm)的水分处理则显著提高了间作向日葵模式下的小麦产量。对于间作下的玉米产量构成而言,由于间作模式耗水量大,单作模式的灌水定额满足不了间作模式,但是通过适当水量调控,主要是适当地减少小麦分蘖与拔节期的灌水量,相应增加小麦乳熟与玉米灌浆吐丝期的灌水量,有利于大幅提高缺水地区间作模式下的玉米产量。对于间作下的向日葵产量构成而言,表现出受适当的水分胁迫会提高产量的规律,特别是对间作模式下的向日葵在小麦乳熟期中度水分胁迫处理、在向日葵现蕾期轻度水分胁迫处理的产量较高,而小麦乳熟期轻度水分胁迫处理、向日葵现蕾期充分灌水处理的向日葵产量最高,且两处理间产量差异不明显($P>0.05$)。对于出现一些非充分灌溉下的间作作物产量高于单作下的充分灌溉产量,是由于间作模式改善了通风透光条件,增大了间作作物对光能、热能的利用率,且边界效应显著,虽然受水分不足的影响,但通过适当水量调控,特别是灌浆后期适度的水分胁迫,反而有增产效应,通过这些因素的共同作用,只要水分亏缺不是特别严重,通过适宜调配是可以达到增产目的。

不同水分处理对间作下的各作物产量对水分的敏感指数影响较大,表现为小麦的敏感指数最高,玉米次之,向日葵最低,总灌溉量 339 mm(67、82、82、67、41 mm)的处理最接近当地间作向日葵模式下的小麦实际需水情况,总灌溉量 437 mm(97、97、97、97、49 mm)的处理最接近当地间作玉米模式下的小麦实际耗水情况。而最适当地间作下的玉米与向日葵实际需水规律的处理为总灌溉量 377 mm(67、97、97、67、49 mm)的处理。

水分胁迫对各作物的收获指数影响程度不同,间作下的小麦受水分胁迫后其收获指数普遍提高,可见水分胁迫对小麦的收获指数有正向效应。对于间作模式下玉米的收获指数,则呈现随灌水总量上升而逐渐上升的趋势,说明间作模式下的玉米灌溉定额应高于单作模式下的灌溉定额,且对间作模式下的玉米进行适度的水分胁迫处理可显著提高玉米的收获指数。而对于间作模式下受水分胁迫处理的向日葵收获指数而言,虽然间作模式提高了向日葵的籽粒产量,但其提高幅度低于生物产量的提高幅度,反而降低了间作模式向日葵的收获指数。

4　结　论

1) 对于水资源短缺特别是水资源总量变化不大的地区,不适宜小麦/玉米间作的种植模式,而适宜小麦/向日葵间作的种植模式,总灌水量 407 mm(82、97、97、82、49 mm)的灌水处理最适宜,不但提高了小麦的产量,也提升了向日葵的产量。

2) 间作模式下的小麦、玉米、向日葵三种作物产量对水分的敏感指数大小为小麦 > 玉米 > 向日葵。

3) 非充分灌溉对间作下的小麦收获指数有普遍的提升作用,而对间作下的向日葵有抑制作用,间作下的玉米收获指数会随非充分灌溉灌水总量的提高而显著提高。

参 考 文 献:

[1] 史宝成,刘　钰,蔡甲冰.不同供水条件对冬小麦生长因子的影响[J].麦类作物学报,2007,27(6):1089-1095.

[2] 成雪峰,张凤云,柴守玺.灌水处理对春小麦穗部性状和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):13-18.

[3] 刘　培,蔡焕杰,王　健.土壤水分胁迫对冬小麦生长发育、物质分配及产量构成的影响[J].农业现代化研究,2010,31(3):330-333.

[4] 任丽雯,马兴祥.石羊河流域水分胁迫对玉米生长发育指标和产量的影响[J].干旱气象,2014,32(5):760-764,772.

[5] 杨生龙,贾志英.不同水分处理对水稻和旱稻产量及产量构成因子的影响[J].安徽农业科学,2010,38(31):17410-17412,17418.

[6] 於　琍,于　强,罗　毅,等.水分胁迫对冬小麦物质分配及产量构成的影响[J].地球科学进展,2004,23(1):105-112.

[7] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J].生态学报,2004,24(7):1556-1560.

[8] 胡继超,曹卫星,姜　东,等.小麦水分胁迫影响因子的定量研究Ⅰ.干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2004,30(4):315-320.

[9] 李　慧,田　奇,李娜娜,等.水分胁迫对冬小麦粒叶比及产量构成的影响[J].中国农学通报,2009,25(09):120-125.

(下转第 61 页)

特征[J].中国沙漠,2012,32(3):698-704.
[8] 许　强,吴宏亮,康建宏,等.旱区砂田肥力演变特征研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):37-41.
[9] 马　波,田军仓.老压砂地西瓜水肥效应研究[J].节水灌溉,2012,(7):5-9.
[10] Li Xiao Yan. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China[J]. Journal of hydrology,2002,260(1-4):151-160.
[11] 谢忠奎,王亚军,陈士辉,等.黄土高原西北部砂田西瓜集雨补灌效应研究[J].生态学报,2003,23(10):2032-2039.
[12] Xie Zhongkui, Li Fengmin, Wang Yajun, et al. The effect of supplemental irrigation on watermelon (*Citrullus lanatus*) production in gravel and sand mulched fields in the Loess Plateau of northwest China[J]. Agricultural Water Management,2004,69(1):29-41.
[13] 聂卫波,费良军,马孝义.区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究[J].农业机械学报,2011,42(7):102-108.
[14] 黄琳琦,向业凤,魏孝荣,等.六盘山林区土壤物理性质分布特征[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):60-65.
[15] Moustafa M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt[J]. Agricultural Water Management,2000,42(3):291-312.
[16] 王卫华,王全九.基于 GPS 与 GE 的土壤水力参数空间变异采样间距确定[J].农业机械学报,2014,45(3):97-100.
[17] 李丁仁,鲁长才,周　旋,等.宁夏压砂地生产现状与可持续发展建议[J].宁夏农林科技,2011,52(1):1-3,42.
[18] 白一茹,王幼奇,展秀丽.陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物理性质及分布特征的影响[J].中国农业科学,2013,46(8):1619-1627.
[19] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
[20] 宋　玉,塔西甫拉提·特依拜,吴雪梅,等.于田绿洲不同季节表层土壤盐渍化程度的空间变异特征[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):171-175.
[21] 李志鹏,赵业婷,常庆瑞.渭河平原县域农田土壤速效养分空间特征[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):163-170.
[22] 张　敏,袁　辉.拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J].郑州工业大学学报,1997,18(1):84-88.
[23] 廖凯华,徐绍辉,程桂福.大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征[J].土壤,2009,41(1):147-151.
[24] Duffera M, White J G, Weisz R. Spatial variability of Southeastern US Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management[J]. Geoderma,2007,137(3):327-339.
[25] Miao Y, Mulla D J, Robert P C. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: implications for precision corn management[J]. Precision Agriculture,2006,7(1):5-20.
[26] Wang Y Q, Shao M G. Spatial variability of soil Physical properties in a region of the loess plateau of PR China subject to wind and water erosion[J]. Land Degradation & Development,2013,24(3):296-304.
[27] ÖZGÖZ E, GÜNAL H, ÖNEN H, et al. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties[J]. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarim Bilimleri Dergisi - Journal of Agricultural Sciences,2012,18(1):77-91.
[28] Bai Y R, Wang Y K. Spatial variability of soil chemical properties in a Jujube slope on the Loess Plateau of China[J]. Soil Science,2011,176(10):550-558.
[29] 牛海山,李香真,陈佐忠.放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响[J].草地学报,1999,7(3):211-216.
[30] 张　扬,赵世伟,华　娟.宁南山区草地植被恢复方式对土壤饱和导水率的影响[J].中国水土保持科学,2009,7:100-104.
[31] 吕殿青,邵明安,刘春平.容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):154-157.
[32] 贺康宁.水土保持林地土壤水分物理性质的研究[J].北京林业大学学报,1995,17(3):44-50.
[33] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J].土壤学报,2013,50(3):469-477.

(上接第 37 页)

[10] 王　敏,张从宇,姚维传,等.不同生育期干旱胁迫对小麦产量的影响[J].安徽农业科学,2001,29(5):605-607,610.
[11] 张玉书,米　娜,陈鹏狮,等.土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J].中国农学通报,2012,28(3):1-7.
[12] 单玉芬,王立坤,马永胜,等.不同水分亏缺对向日葵产量、水分利用效率及经济效益的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(7):70-73.
[13] 胡树平,高聚林,吕佳雯,等.源库调节对向日葵产量及其构成的影响[J].西北农业学报,2013,22(8):52-58.
[14] Plaut Z, Butow B J, Blumenthal C S, et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research,2004,86:185-198.
[15] Ehdaie B, Alloush G A, Madore M A, et al. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat[J]. Crop Science, 2006,46:735-746.
[16] 田纪春,邓志英,胡瑞波,等.不同类型超级小麦产量构成因素及籽粒产量的通径分析[J].作物学报,2006,32(11):1699-1705.
[17] 韩惠芳,赵丹丹,沈加印,等.灌水量和时期对宽幅精播冬小麦产量及品质特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):109-114.
[18] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等.不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):455-463.