

小麦间作玉米农田耗水特性及产量变化对根系分隔的响应

冯福学¹, 孔学夫², 殷文², 胡发龙², 赵财², 柴强², 杨彩红²
(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过田间试验, 研究了小麦间作玉米塑料薄膜隔根(PW//C)、尼龙网隔根(NW//C)、不隔根(W//C)及单作玉米(C)和单作小麦(W)对土壤水分、棵间蒸发和水分利用效率的影响。结果表明, 根系分隔显著影响作物的耗水特性, 从而显著影响作物产量及水分利用效率的提高。小麦收获前, W//C、NW//C 和 PW//C 处理玉米带土壤水分含量均高于小麦带, 分别提高 2.38%、3.82% 和 6.13%; 小麦收获后, NW//C 和 PW//C 处理玉米带土壤水分含量却均低于小麦带, 分别降低 5.41% 和 16.07%, 而 W//C 处理玉米带和小麦带间水分差异不显著。根系分隔显著增大了间作模式的作物棵间蒸发量, NW//C 和 PW//C 较 W//C 处理分别显著提高 6.71% 和 20.13%。以单作小麦、单作玉米加权平均为对照, W//C、NW//C 和 PW//C 处理分别显著提高经济产量 33.60%、26.93% 和 24.69%, 增大耗水量 -0.2%、1.02% 和 6.69%, 显著提高水分利用效率 34.93%、26.67% 和 17.80%。W//C 处理较 NW//C 和 PW//C 处理分别提高经济产量 5.25% 和 7.14%, 降低耗水量 1.21% 和 6.64%, 提高水分利用效率 6.52% 和 14.54%。

关键词: 小麦间作玉米; 隔根; 土壤水分; 水分利用效率; 产量
中图分类号: S316 **文献标志码:** A

Water consumption characteristic and yield changes in response to different root partition patterns in wheat-maize intercropping system

FENG Fu-xue¹, KONG Xue-fu², YIN Wen², HU Fa-long², ZHAO Cai², CHAI Qiang², YANG cai-hong²
(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A field experiment was conducted from March to October in 2009 to investigate the effects of different root partition patterns (roots of intercropped wheat-maize were separated by plastic film (PW//C), and nylon (NW//C), no-root-separation (W//C), sole wheat, and sole maize) on soil water, soil evaporation and water use efficiency (WUE) of wheat-maize intercropping system. The results indicated that the intercropping systems significantly affected the characteristic of soil water consumption that markely improved crop yield and WUE during two crops growing stage. Root partition patterns significantly decreased soil water dynamic and crop yield. Before harvesting wheat, W//C, NW//C and PW//C treatments improved soil water storage of maize strip by 2.38%, 3.82% and 6.13% than that of wheat strip, respectively. However, after harvesting wheat, NW//C and PW//C treatments decreased soil water storage of maize strip by 5.41% and 16.07% than that of wheat strip, respectively. However, no significant difference was found in soil water storage between wheat and maize strips by W//C treatment. Root partition patterns significantly increased the soil evaporation, and NW//C and PW//C treatments significantly increased soil evaporation by 6.71% and 20.13% compared with NW//C treatment, respectively. Compared to the weighted averages of sole wheat and maize, W//C, NW//C and PW//C treatments significantly improved yield by 33.60%, 26.93% and 24.69%, water consumption by 0.2%, 1.02% and 6.69%, and water use efficiency(WUE) by 34.93%, 26.67% and 17.80%, respectively. Compared to NW//C and PW//C treatments, W//C treatments significantly improved yield by 5.25% and 7.14%, decreased water consumption by 1.21% and 6.64%, and improved WUE by 6.52% and 14.54%, respectively.

收稿日期: 2015-05-27
基金项目: 国家自然科学基金(31301283, 31360323, 41561062); 国家科技支撑计划(2012BAD14B10)
作者简介: 冯福学(1978—), 男, 甘肃武威人, 博士, 主要从事绿洲农作制、保护性耕作理论与技术及节水农业等方面的研究。
E-mail: fengfuxue@163.com.

Keywords: wheat-maize intercropping system; root partition pattern; soil water; water use efficiency; yield

间作套种既是我国农业生产中的传统栽培方法,又是一种较为普遍的高产种植方式,它能充分利用地力、光能、热能资源^[1-3],是作物增产的重要措施之一。随着中国人口不断增长,水土资源日趋减少,粮食生产问题日益突出,如何进一步发挥间套作提高资源利用效率的作用备受关注^[4]。西北内陆灌区光资源丰富,热量条件适于发展间作套种,然而传统间套作由于其耗水量过大及区域内资源性缺水已严重影响到该种植模式的应用,有学者建议通过压缩间作面积来缓解农业水资源供需矛盾^[5],政府部门也已明确限制并压缩间套种植面积。这一举措一定程度上可以缓解农业水资源供需矛盾,但使单位耕地产出率明显降低,显著影响了农业整体效益的提高^[6-7]。因此,进一步深入研究间套作群体耗水特性对构建适于区域发展的高效节水间套作技术具有重要意义。

而由两种或两种以上作物组成的复合群体中,不同作物根系在土壤中的生态位不同,同时不同作物的需水规律不同,加之不同组分的播种时间不同,必将造成两种作物在生育期需水时间的错位,从而使土壤水分在作物复合群体共生期内组分间进行优化分配成为可能。研究不同种植模式土壤水分时空分布及耗水特征,明确复合群体内水分变化规律,对构建间作高效节水灌溉技术将产生重要指导作用,也将对间套复合群体精细灌溉的实施提供理论基础。为此,通过田间试验,以西北地区主导间作模式小麦间作玉米为研究对象,利用根系分隔方法,研究隔根对小麦间作玉米土壤水分、棵间蒸发、耗水量及产量的影响,明确了复合群体组分内土壤耗水特性,以为间作复合群体的高产节水技术提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2009 年 3—10 月在甘肃省武威市甘肃农业大学与武威市农技中心校地联合绿洲农业科研教学基地(103°5'E, 37°30'N)进行,试验地处甘肃河西走廊东端,属寒温带干旱区,大陆性气候,日照充足,干旱少雨,春季多风沙,夏季有干热风。海拔 1 531 m,常年降雨量 164.4 mm,降水量年际变化不大但季节变化较大,主要集中在 7—9 月份,冬春季较干旱,该段时间的降雨量不能满足作物对水分的需求;年蒸发量 2 400 mm,年平均气温 7.8℃,一月份最低气温 -27.7℃,七月份最高气温 34.0℃,干燥

度 5.85, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温为 3 513.4℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为 2 985.4℃;日照时数 2 945 h,全年无霜期 156 d,绝对无霜期 118 d;年太阳辐射总量 504 ~ 630 $\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,麦收后 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温为 1 350℃,属于典型的两季不足、一季有余自然生态区。供试土壤为厚层灌漠土,容重 $1.57\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,耕层土壤有机质含量 $15.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮、全磷含量分别为 0.87、1.02 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 13.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 248.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值为 8.2。

1.2 试验设计

试验设单作小麦(W)、单作玉米(C)、小麦//玉米(W//C)、塑料薄膜隔根小麦间作玉米(PW//C)、尼龙网隔根小麦间作玉米(NW//C)共 5 个处理。其中,塑料薄膜为厚 0.12 mm 的农用棚膜,尼龙网孔径为 300 目。每处理重复 3 次,田间随机排列,小区长 8 m,宽 3.2 m。

不同处理的主要技术参数为 W:单作小麦,播种密度 675 万粒 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 、行距 12 cm,生育期内灌水 2 700 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$; C:单作玉米,播种密度 82 500 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,行距 40 cm,地膜覆盖,生育期灌水 3 600 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$; W//C:小麦带宽 80 cm,种 6 行、行距 12 cm,播种密度 450 万粒 $\cdot\text{hm}^{-2}$;玉米带宽 80 cm,播种密度 52 500 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,种 2 行、行距 40 cm、株距 32 cm,地膜覆盖,生育期内灌水 3 200 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,每小区种两个自然带; PW//C:在小麦玉米共处区内,离小麦 10 cm,离玉米带 20 cm 处用塑料薄膜隔根(图 1),隔根深度为 1 m,其它田间结构同 W//C; NW//C:隔根材料为 300 目的尼龙网,其余设计同 PW//C。

单作小麦及间作小麦带施纯 N 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、纯 P_2O_5 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全做基肥;单作玉米和间作玉米带施纯 N 360 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,按基肥:大喇叭追肥:灌浆期追肥 = 3:6:1 分施,纯 P_2O_5 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全做基肥。

春小麦品种(*Triticum aestivum*)为永良 4 号,春玉米品种(*Zea mays*)为武科 2 号。小麦于 3 月 20 日播种,7 月 15 日收获;玉米于 4 月 18 日播种,10 月 3 日收获。同种作物在单作和间作模式中的播种、收获时间相同。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水分测定 土壤含水量:0~30 cm 土层土壤含水量用烘干法测定,每 10 cm 为一层;30~120 cm 用中子水分仪测定(503 DR, Campbell Pacific Nuclear, Martinez, CA),其中 30~90 cm 土层每 20 cm 测定一次,深层每 30 cm 为一层。单作处理中,每小区设 1 个测定点,中子水分管布置于小区中央,

3 个小区的平均值作为该处理测定值;间作处理每小区分别在小麦带和玉米带中各设 1 个测定点,2 点平均值作为小区土壤含水量测定值,3 个重复的平均值作为该处理的土壤含水量测定值。

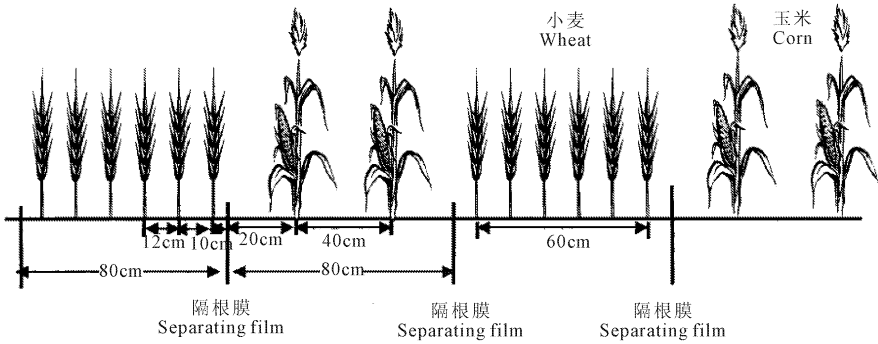


图 1 小麦间作玉米隔根间作处理的田间结构示意图
Fig.1 Sketch showing field spatial pattern of wheat-corn intercropping system

1.3.2 作物棵间蒸发测定 采用微型蒸渗仪(Micro-lysimeter, 简称 MLS)进行测定。根据孙宏勇等^[8]研究,微型蒸渗仪用 PVC 管做成,内径 10 cm、壁厚 5 mm、高 15 cm。每次取土时将其垂直压入作物行间土壤内,使其顶面与地面齐平,取原状土,然后用塑料胶带封底,另用内径为 12 cm PVC 管作外套,固定于行间,使其表面与附近土壤持平,操作时不至破坏周围土体结构。土壤蒸发用称重法测定,2 次称量之间的重量差值为其蒸发量。为保证微型蒸渗仪内部的土壤水分剖面与周围土壤相一致,作物生长早期需要每天更换微型蒸渗仪内的原状土,叶面积指数增大后,每 3~5 d 更换 1 次,降雨和灌溉后立即更换土体。单作每个小区设 1 个测定点,间作按小麦带、玉米带设 2 个观测点。

1.3.3 作物水分利用效率测定

作物水分利用效率(WUE): $WUE(kg \cdot m^{-3}) = Y / (P + I + \Delta W)$

其中, Y 为作物籽粒产量, P 为降水量, I 为灌溉量, ΔW 为作物播种前和收获后的土壤含水量之差^[9-10]。因本试验设计的灌水量相对较小,加之试验期间降水稀少,渗漏量可忽略不计;试验区地下水埋深在 30 m 以下,因此未考虑地下上升水的影响。

1.3.4 作物产量测定 小麦和玉米收获时,按小区测实产。

1.4 数据分析

数据处理采用 Excel 软件和 DPS7.05 统计分析软件整理。

2 结果与分析

2.1 隔根处理及种植模式对小麦、玉米土壤水分的影响

2.1.1 不同处理全生育期的土壤平均含水量 间

作及隔根方式显著影响作物全生育期内的平均土壤含水量(0~120 mm)(图 2)。与单作小麦相比,不隔根处理间作(W//C)和尼龙网隔根处理(NW//C)分别显著提高土壤贮水量 5.80% 和 2.52%,而与塑料隔根处理(PW//C)差异不显著;与单作玉米相比,不隔根处理提高土壤贮水量 1.17%,而 NW//C 和 PW//C 处理分别降低 1.97% 和 4.06%。以两种单作土壤贮水量的平均值作对照比较发现, W//C 处理提高 3.43%, PW//C 处理降低 1.91%,而与 NW//C 处理差异不显著,而间作之间, W//C 处理高于 NW//C 和 PW//C 处理。说明间作有利于减小土壤水分的损耗,而根系分隔措施会降低间作复合群体的土壤水分含量。

2.1.2 间作群体不同带内全生育期的土壤含水量差异 为了更进一步研究隔根对小麦间作玉米群体土壤水分的影响,分别研究了不同处理小麦带和玉米带土壤水分的变化。小麦间作玉米群体内,由于两种作物的生长特性不同,且群体内不同带内的作物覆盖程度不同,导致全生育期土壤平均含水量在小麦带、玉米带内的含水量差别较大(图 3)。比较发现,无论是小麦带还是玉米带土壤水分含量均表现为不隔根处理(W//C) > 尼龙网隔根(NW//C) > 塑料隔根(PW//C)。与 NW//C 和 PW//C 处理相比, W//C 处理分别显著提高土壤贮水量玉米带为 3.99% 和 7.79%,小麦带为 2.42% 和 3.16%,而 NW//C 较 PW//C 处理显著提高玉米带土壤贮水量为 3.66%,而小麦带差异不大。而处理内部, PW//C 处理小麦带水分含量高于玉米带,提高 2.58%,而 W//C 和 NW//C 处理却与之相反。由此说明,不同材料根系分隔会显著影响间作群体内土壤水分的运转。

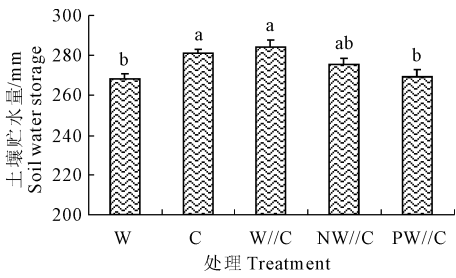
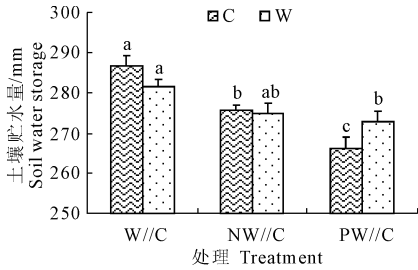


图 2 不同处理全生育期 0~120 cm 土壤平均贮水量

Fig.2 Soil water storage in 0~120 cm depth by different treatments during the whole growing period



注 Note: C—玉米带 Maize strip; W—小麦带 Wheat strip. 下同 The same below.

图 3 不同处理小麦带与玉米带全生育期 0~120 cm 土壤平均贮水量差异

Fig.3 Differences in soil water storage in 0~120 cm depth of wheat and maize strip among different treatments during the whole growing period

2.1.3 不同间作处理不同带内土壤水分的动态特征 小麦、玉米生育期差别较大,在间作小麦收获前后,复合群体地面的覆盖度差异极大,细化研究不同处理土壤水分的时间动态变化对制定间作群体的精细水分管理对策具有重要意义。不同间作处理不同带内土壤水分含量随时间变化的动态如图 4。由图 4 看出,小麦收获前(7 月 11 日),W//C、NW//C 和 PW//C 处理玉米带土壤水分含量均高于小麦带,分别提高 2.38%、3.82% 和 6.13%;小麦收获后至玉米收获时(9 月 20 日),NW//C 和 PW//C 处理玉米带土壤水分含量却均低于小麦带,分别降低 5.41% 和 16.07%,而 W//C 处理玉米带和小麦带间土壤水分差异不显著。由此表明,间作群体组分生长共生期,根据各组分不同生育期生长对水分的需求,水分在各组分带内会进行有效分配。

2.2 隔根方式对不同处理作物棵间蒸发量的影响

2.2.1 隔根方式对不同处理日平均作物棵间蒸发量的影响 土壤蒸发是作物耗水量中一个非常重要的部分,对调节作物的生长环境有很重要的作用。在作物整个生育阶段对单作群体和间作群体棵间土壤蒸发进行测定,结果表明,土壤棵间蒸发因受土壤

供水状况、灌水湿润方式、作物生长发育和大气蒸发力等因素的共同影响,不同处理在整个生育期日平均棵间蒸发量存在明显差异(图 5)。其中,W//C、NW//C 和 PW//C 三种处理都较单作小麦和单作玉米显著增大了棵间蒸发量,说明间作能增大土壤水分的无效消耗。与单作小麦相比,W//C、NW//C 和 PW//C 处理分别显著增大棵间蒸发量 12.88%、20.45% 和 35.61%,与单作玉米相比,分别显著增大 8.76%、16.06% 和 30.66%。同时由图 5 还可以看出,根系分隔显著增大了间作模式的作物棵间蒸发量。与 W//C 相比,NW//C 和 PW//C 分别显著提高棵间蒸发量 6.71% 和 20.13%。

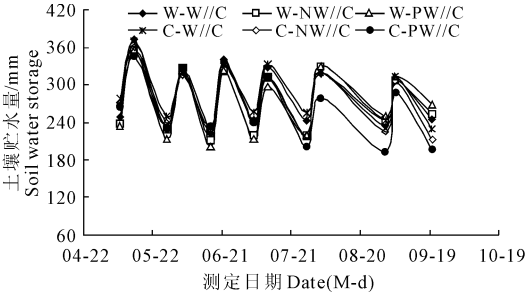


图 4 不同处理小麦带与玉米带全生育期 0~120 cm 土壤平均贮水量动态变化

Fig.4 Dynamic changes in soil water storage in 0~120 cm depth of wheat and maize strip among different treatments during the whole growing period

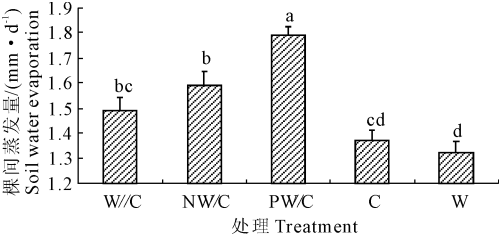


图 5 不同处理日平均棵间土壤蒸发量

Fig.5 The daily averages of soil water evaporation of intercropped wheat-maize by different treatments during the whole growing period

2.2.2 隔根方式对不同处理作物生育期内逐日棵间蒸发量的影响 作物生育期间田间棵间蒸发受到降雨量、种植方式、作物生长发育和大气蒸发强度的共同影响,在生育期内呈现波动变化,不同处理作物土壤棵间蒸发逐日变化过程如图 6 所示。间作群体的土壤蒸发以小麦行间的 MLS 数据和玉米行间的 MLS 数据为基础,以小麦行和玉米行所占比例进行加权平均确定。

在小麦分蘖之前,单作玉米及间作玉米带覆盖度小,棵间蒸发大,此期棵间蒸发 C > PW//C >

NW//C>W//C>W。从5月初到7月中旬,由于主要受灌水、外界气温变化等因素的影响,各处理棵间蒸发波动大。这个时期,由于各处理地上部分生长变化较大,对地表的遮荫不同,棵间蒸发也不同,但作物棵间蒸发程度依然是C>PW//C>NW//C>W//C>W。小麦收获后(7月20),随着灌水次数的减少,土壤水分变化相对较小,作物棵间蒸发波动较

小。7月下旬到9月初,间作玉米处于补偿效应生长阶段,叶面积指数逐渐增大,对地表的遮荫逐渐增大,但由于小麦收获后空白带的存在,棵间蒸发大,间作大于单作玉米,棵间蒸发PW//C>NW//C>W//C>C。从9月上旬开始,由于各处理土壤水分逐渐变小,且逐渐趋于相对较稳定,随之棵间蒸发逐渐变小。

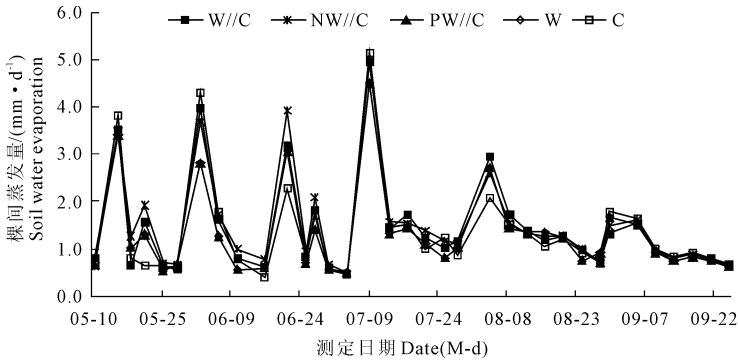


图 6 不同处理作物生育期内棵间蒸发逐日变化

Fig.6 The daily changes in soil water evaporation of intercropped wheat-maize by different treatments during the whole growing period

2.3 间作及隔根对小麦、玉米产量及水分利用效率的影响

根系分隔显著影响了间作的产量及水分利用效率。以单作小麦、单作玉米经济产量的加权平均为对照,研究单作与间作的产量发现,间作显著提高作物的经济产量,W//C、NW//C和PW//C处理分别显著提高33.60%、26.93%和24.69%。而在3种间作处理间,W//C处理较NW//C和PW//C处理分别提高经济产量5.25%和7.14%,表明隔根不利于间作群体产量的提高。

由两种或两种以上作物组成的间作群体中,由于不同作物的耗水特性不同,如果以某一单作作物耗水量为对照分析间作的耗水量,容易造成分析结果较大的误差。根据表1,以单作小麦、单作玉米耗水量总和的一半为对照,分析间作与单作耗水特性,结果发现,NW//C和PW//C处理的耗水量分别增大1.02%和6.69%,相应水分利用效率(WUE)却分别显著提高26.67%和17.8%,W//C处理较对照降低0.2%,但水分利用效率却显著提高34.93%。而3种间作处理间W//C处理较NW//C和PW//C处

表 1 不同处理下小麦、玉米耗水量及水分利用效率

Table 1 Water consumption, yield and WUE of wheat and maize by different treatments

处理 Treatment	耗水量 Water consumption /(mm·hm ⁻²)	玉米产量 Maize yield /(kg·hm ⁻²)	小麦产量 Wheat yield /(kg·hm ⁻²)	总产量 Total yield /(kg·hm ⁻²)	WUE /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
单作玉米 (C) Sole maize	520a	9821a	—	9821b	18.89c
单作小麦 (W) Sole wheat	382.4d	—	6482a	6482c	16.95d
尼龙网隔根小麦间作玉米(NW//C) Wheat-maize intercropping that root separat- ed by nylon	455.8bc	6673b	3674bc	10347ab	22.70ab
塑料隔根小麦间作玉米(PW//C) Wheat-maize intercropping that root separat- ed by plastic film	481.4b	6663b	3501c	10164ab	21.11b
不隔根小麦间作玉米(W//C) Non-root-separation	450.3c	7058b	3832b	10890a	24.18 a

注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: Different small letters indicate significant difference at the 0.05 level.

理分别降低耗水量 1.21% 和 6.46%，相应显著提高水分利用效率 5.52% 和 14.54%，NW//C 处理较 PW//C 处理降低耗水量 5.32%，显著提高水分利用效率 7.53%。由此表明，间作能显著增大土壤耗水量，根系分隔会显著降低作物对水分的利用。

3 结论与讨论

隔根措施显著影响小麦间作玉米的产量优势。本研究中，不隔根间作处理较尼龙网隔根和塑料膜隔根间作处理分别提高经济产量 5.25% 和 7.14%，其主要原因可能是隔根降低了群体组分带土壤水肥交流和根系在空间上的叠加补偿效应^[11]。而间作群体中，作物根系在空间上的重叠和生理生态学特性的改变是决定地下部分对产量贡献大小的重要原因，郝艳如等^[12]在采用隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响研究中指出，塑料膜隔根使间作作物根系大小发生变化，最终导致复合群体产量下降。

隔根方式显著影响间作群体作物组分带间的水分运移。本研究中，与不隔根处理相比，尼龙网隔根和塑料膜隔根分别显著提高棵间蒸发量 6.71% 和 20.13%。同时，不隔根间作处理较尼龙网隔根和塑料膜隔根间作处理分别减小耗水量 1.21% 和 6.46%，尼龙网隔根处理较塑料膜隔根处理减小 5.32%，这可能与两种作物生长共生期对水分的需求存在竞争与互补从而导致水分在间作两组分带内有效分配有关。而本研究中，小麦收获前，不隔根间作处理、尼龙网隔根和塑料膜隔根间作处理玉米带土壤水分含量均高于小麦带，分别提高 2.38%、3.82% 和 6.13%；小麦收获后，尼龙网隔根间作处理和塑料膜隔根间作处理玉米带土壤水分含量却均低于小麦带，分别降低 5.41% 和 16.07%，而 W//C 处理玉米带和小麦带间土壤水分差异不显著。这一研究结果与已有的研究结果不一致^[13]，但均说明间作小麦与玉米在水分利用上有明显的时间、空间生态位差异^[14-15]。本研究中，间作的耗水量较单作平均增大 -0.2% ~ 6.69%，这一结果与 Morris 等^[16]总结提出的间作与相应单作耗水量的加权平均差异很小，与一般在 -6% ~ 7% 之间变化的结论具有极大相似性。

间套作提高 WUE 的重要原因之一是提高了作物对水分的可利用性以及水分的运转效率^[17]。不隔根条件下，间作群体作物根系能够充分利用土壤水肥资源，从而提高作物产量形成潜力，提高水分利用效率，而尼龙网隔根使间作群体组分土壤中水肥可以运移，但根系彼此隔离，而塑料隔根使间作群体

组分带水肥运转及两种作物根系彼此穿插几乎完全隔离，减小了群体根系对土壤资源的利用，从而减小产量形成潜力，降低水分利用效率。本研究中，不隔根处理较尼龙网隔根和塑料膜隔根间作处理分别显著提高水分利用效率 6.52% 和 14.54%，尼龙网隔根较塑料膜隔根间作处理显著提高 7.35%。由此也表明，隔根程度越大，对间作群体水分利用效率的影响越大，从而也进一步表明，间作群体组分带间水分的有效分配是间作产量及水分利用效率提高的重要基础。

参考文献:

- [1] 黄高宝. 集约栽培条件下间套作的光能利用理论发展及其应用[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 16-24.
- [2] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Res, 2001, 71: 123-137.
- [3] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs. Part I. Competition and yield advantages[J]. Field Crops Abstr, 1979, 32(1): 1-10.
- [4] 卢良恕. 中国立体农业概论[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
- [5] 赵致禧, 姚正良, 肖占文. 张掖地区应压缩小麦/玉米带田种植面积[J]. 甘肃农业科技, 2002, (4): 12-13.
- [6] 柴强. 间套复合群体水分高效利用机理研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 11-15.
- [7] 刘巽浩. 耕作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 221-224.
- [8] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 不同长度 Micro-lysimeter-测定土壤蒸发的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版) 2003, 31(4): 167-170.
- [9] Bandyopadhyay P K, Mallick S, Rana S K. Water balance and crop coefficients of summer-grown peanut (*Arachis hypogaea* L.) in a humid tropical region of India[J]. Irrig Sci, 2005, 23: 161-169.
- [10] Philip E, Mustafa P. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in the northern Syria[J]. Plant Soil, 2005, 268: 195-208.
- [11] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争能力及其产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31-34.
- [12] 郝艳如, 劳秀荣, 赵秉强, 等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(1): 71-74.
- [13] 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.
- [14] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 8(14): 1301-1304.
- [15] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间作农田根、水肥时空协调性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 53-56.
- [16] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Water[J]. Field Crops Research, 1993, 34(3/4): 303-317.
- [17] Mandal B K. Wheat-based intercropping and effects of irrigation and mulch on growth and yield[J]. Indian J Agron, 1991, 36: 23-29.