

玉米马铃薯间作群体的蒸腾量和蒸腾效率研究

范志伟, 吴开贤, 安瞳昕, 杨圆满, 周 锋, 吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘 要: 以玉米(*Zea mays* L.)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)间作为研究对象,结合大田和盆栽试验,通过观测土壤蒸发、土壤含水量和作物蒸腾量,分析作物的水分竞争能力和间作的产量优势,研究间作对作物水分利用的影响特征与机理。大田试验结果表明:①玉米与马铃薯在同一时期的蒸腾量差异导致了两作物种植区域之间的土壤含水量差异;②间作的蒸腾量 $4\,424.07\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾量的加权平均值 $3\,612.27\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P<0.01$);③间作的土地当量比 LER(land equivalent ratio) >1 ($P<0.01$),说明间作表现了增产优势。盆栽试验结果表明:①玉米和马铃薯在同一时期的蒸腾量存在差异,这意味着两作物种植区域的土壤含水量也存在差异(盆栽试验已基本消除土壤蒸发,土壤含水量主要受作物蒸腾影响);②间作的蒸腾量 $51.79\text{ kg}\cdot\text{盆}^{-1}$ 显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾量的加权平均值 $48.36\text{ kg}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($P=0.011$);③作物的种间相对竞争力 RC(Relative competitive ability) >1 ($P<0.001$),说明玉米在种间水分竞争中占据优势地位;④玉米的蒸腾效率 $5.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著大于马铃薯的 $3.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.001$);⑤间作的蒸腾效率 $4.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾效率的加权平均值 $4.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.001$);⑥间作的土地当量比 LER >1 ($P=0.001$),说明间作表现了增产优势。以上结果说明:玉米和马铃薯在同一时期的蒸腾量差异可以导致它们种植区域之间的土壤含水量差异,进而使得在间作中,一种作物可以利用另一种作物种植区域的较多土壤水分,所以间作可以提高作物群体蒸腾量;玉米既具有较高的蒸腾效率,又在种间水分竞争中占据优势地位,因此玉米马铃薯间作可以提高作物群体蒸腾效率;蒸腾量和蒸腾效率的协同提高是该间作表现增产优势的重要原因。

关键词: 间作;玉米;马铃薯;蒸腾量;蒸腾效率

中图分类号: S344.2 文献标志码: A

Study on transpiration and transpiration efficiency of intercropped maize and potato population

FAN Zhi-wei, WU Kai-xian, AN Tong-xin, YANG Yuan-man, ZHOU Feng, WU Bo-zhi
(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: It has been suggested that the over-yielding of intercropping is highly correlated to its efficient use of water resource. However, the efficiently water usage of intercropping has not been comprehensively studied from the aspect of transpiration (the major form of crop water usage). In this study, using intercropped maize (*Zea mays* L.) and potato (*Solanum tuberosum* L.) as the study object, we combined the field and pot experiments to observe the soil evaporation, soil moisture content and crop transpiration. We also analyzed the competitive ability of intercropped crops and the yield advantage of intercropping, and investigated the water usage feature and mechanism in intercropping. The field experiment result showed that the transpiration difference between maize and potato during the same period could lead to the soil moisture content difference. In addition, the transpiration in intercropping of $4\,424.07\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ was significantly higher than the weighted average of that in sole maize and sole potato of $3\,612.27\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P<0.01$). Furthermore, the land equivalent ratio (LER) of intercropping was >1 , indicating that the intercropping had the yield advantage. The pot experiment result showed that the transpiration of maize and potato was different during the same period. Namely, the transpiration of maize was smaller than that of potato before the tuber initiation stage of potato and seedling stage of maize ($P<0.05$), and higher than that of potato after that period ($P<0.05$). Additionally, the transpiration in intercropping of

收稿日期: 2015-07-10
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB100402); 国家教育部博士点专项基金(20125302110001)
作者简介: 范志伟(1979—), 男, 山西永济人, 博士研究生, 主要从事农业可持续发展研究。E-mail: Fanzw2010@hotmail.com。
通信作者: 吴伯志(1960—), 男, 云南玉溪人, 博士, 教授, 主要从事作物栽培与土壤耕作研究。E-mail: Bozhiwu2003@aliyun.com。

51.79 kg·pot⁻¹ was significantly higher than the weighted average of that in sole maize and sole potato of 48.36 kg·pot⁻¹ ($P = 0.011$). Moreover, the relative competitive ability (RC) between the intercropped crops was > 1 , indicating that maize had water competitive advantage. Also, the transpiration efficiency of maize (5.38 g·kg⁻¹) was significantly higher than that of potato (3.68 g·kg⁻¹) ($P < 0.001$). The transpiration efficiency in intercropping of 4.82 g·kg⁻¹ was significantly higher than the weighted average of that in sole maize and sole potato of 3.68 g·kg⁻¹ ($P < 0.001$). The land equivalent ratio (LER) of intercropping was > 1 , indicating that the intercropping had the yield advantage. Overall, our results suggested that the transpiration of maize is different from that of potato during the same period. Thereby the intercropping can improve the crop transpiration. Maize has the higher transpiration efficiency than potato, and maize has the water competitive advantage in intercropping, allowing improvement of the crop transpiration efficiency. The improvement of both crop transpiration and transpiration efficiency in intercropping is an important reason for over-yielding in intercropping.

Keywords: intercropping; transpiration; transpiration efficiency; Maize; Potato

间作是指在同一块土地上同时种植两种或两种以上作物的种植方式^[1]。该种植方式的主要优点是具有显著的增产优势^[2],因此被广泛应用于中国^[3]、印度^[4]、东南亚^[5]、拉丁美洲^[6]和非洲等地区^[7]。长期以来,科学家对间作的增产机制进行了大量研究,发现间作的增产优势与其可以促进作物对环境资源的高效利用有关:一方面,间作可以提高作物的资源获取量,另一方面,间作能够提升作物对已获得资源的利用效率,即将其更高效率地转化为生物量^[8-9]。

水分是影响作物生长和产量的主要环境资源之一,对其的高效利用是作物在干旱和半干旱条件下实现增产的重要保障。作物的水分利用能力主要体现在两个方面,一是作物的水分吸收量,由于超过99%的植物吸收水分经由蒸腾散失,蒸腾量一定程度代表了作物的水分吸收量^[10];二是作物对所吸收水分的转化效率,即蒸腾效率。目前,间作对作物水分利用的影响已有研究,但是多数研究是从田间蒸腾蒸发总水分的角度进行^[11],没有将作物蒸腾和土壤蒸发拆分,不能有效反映间作对作物蒸腾的影响。尽管也有少数研究是从作物蒸腾水分角度进行,但是,这些研究或者侧重模型估算而非实测手段^[12],或者基于个别时期和特定叶片而非整个生育期和全株进行观测^[13];而且,这些研究均未同时考虑蒸腾量和蒸腾效率,不能全面反映间作对作物水分利用的影响。可见,间作能否促进作物高效利用水分资源需要进一步系统研究。

玉米马铃薯间作是重要的作物多样性种植模式,已在全球许多地区广泛应用,目前该间作模式的群体微环境效应^[14]、病虫害控制效应^[15]和养分资源利用能力^[16-17]等方面已得到了较为深入的研究,然而,该间作模式的水分利用特征及机制尚未见报道。因此,本研究结合大田和盆栽试验,通过观测

土壤蒸发、土壤含水量、作物蒸腾量,分析作物的水分竞争能力和间作的产量优势,研究玉米马铃薯间作体系的蒸腾量和蒸腾效率,为揭示作物多样性种植体系的水分利用特征与机理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 大田试验

1.1.1 试验地概况 试验于2013年在云南农业大学教学实验基地进行(东经102°45′38″,北纬25°18′03″,海拔1930 m);试验地年均温14.7℃,年蒸发量2384 mm,年日照时数2617 h,无霜期240 d,常年平均降雨量为960 mm,主要集中在5—9月;试验地土壤为山地红壤,pH值5.7,土壤有机质含量24.14 g·kg⁻¹,全氮1.4 g·kg⁻¹,全磷3.21 g·kg⁻¹,全钾4.47 g·kg⁻¹,氨态氮4.34 mg·kg⁻¹,硝态氮5.38 mg·kg⁻¹,速效磷17.0 g·kg⁻¹,速效钾113.6 mg·kg⁻¹。

1.1.2 试验设计 供试玉米(*Zea mays* L.)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种为在云南实际生产中广泛应用的‘云瑞88’和‘会-2号’。试验设单作玉米、单作马铃薯、4行玉米间作4行马铃薯3个处理,3次重复,随机区组布局。间作采用添加方案^[14,18],即玉米密度与单作一致(53333株·hm⁻²),额外添加小于单作密度的马铃薯(单作和间作马铃薯密度分别为51948株·hm⁻²和37037株·hm⁻²)。各处理的作物株行距分别为,单作玉米25 cm×75 cm,单作马铃薯35 cm×55 cm,间作玉米20 cm×50 (220)cm,间作马铃薯35 cm×40(250)cm。

1.1.3 种植管理 马铃薯开沟播种,沟宽和沟深分别为25 cm和20 cm左右,播种和收获时间分别为2013年4月2日和8月27日;玉米开沟移栽,沟宽和沟深分别为15 cm和10 cm左右,播种和收获时间分别为5月20日和10月12日。马铃薯播种时施

入普钙 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 $95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和硫酸钾 $65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为底肥,后期不再追肥;玉米播种时施入普钙 $560 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和硫酸钾 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为底肥,在苗期和拔节期分别追施尿素 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除草、病虫害防治与种植地区生产实践一致。

1.1.4 观测指标与方法 叶面积指数:用 Sunscan 植物冠层分析系统(英国 Delta-T)测量,具体方法为,用三脚架将传感器 BF3 水平放置于作物冠层之上,手持 Sunscan 探测器(长度 1 m)于作物行间土壤表面处沿行间对角线测量^[19]。在单作小区、间作小区的玉米带和马铃薯带,分别选择 2 个行间,每个行间观测两次,所得测量值分别取均值为其叶面积指数。分别在 6 月中旬(马铃薯为初花期,玉米为小喇叭口时期;此期马铃薯植株总体较大,在间作的种间竞争中占据优势地位)和 8 月中旬(马铃薯为茎叶枯萎期,玉米为灌浆成熟期;此期玉米植株总体较大,在间作的种间竞争中占据优势地位)进行观测。

土壤蒸发速率:用 PVC 管制成的微型蒸渗仪测量,其内筒和外筒内径分别为 10 cm 和 12 cm,内外筒深度都为 15 cm。使用方法为,将内筒垂直压入土壤,取出盛有未扰动的原状土柱的内筒,削去其底部多余土壤,用塑料膜封底;将外筒固定于内筒取土之处,上底与附近土壤持平;用电子天平对内筒称重,再将其放入外筒,第 2 日相同时间再称重;因选择无降雨时观测蒸发,所以每两天的内筒重量差值即为日土壤蒸发值^[20-21],将该值除以内筒截面面积,则为日土壤蒸发速率。蒸渗仪观测行间同叶面积指数观测行间,每个观测行间放置 2 个蒸渗仪;观测日期同叶面积指数观测日期。

土壤含水量:用土壤水分速测仪 TDR100(美国 SPECTRUM)测量 20 cm 耕层的土壤含水量(选择在 20 cm 耕层观测土壤含水量的主要原因是,本试验地的耕层一般为 20 cm,作物根系主要在该层面分布,而较少在该层面之下的犁底层分布);土壤含水量的观测行间同叶面积指数观测行间,每个行间均匀选择 5 个观测点;观测日期同叶面积指数观测日期。

作物产量:马铃薯和玉米收获时,在各小区随机选择 16 棵样株,于烘箱 80°C 条件下烘干至恒重,称量值取平均后得到单株产量和生物量的干物质重,再结合各处理各作物的种植密度,计算各处理的作物产量和生物量。

1.2 盆栽试验

1.2.1 试验地概况 试验地点与大田试验相同,但

是在日光温室内进行。

1.2.2 试验材料 供试玉米和马铃薯品种与大田试验相同;栽培容器为上口直径 32 cm,下口直径 30 cm,高 28 cm 的塑料盆;栽培基质为大田试验地表土(20 cm)、草炭、蛭石和精制有机肥(N、P、K 各 5%,有机质 40%,腐植酸 15%)按体积比 1:1:1:0.5 混合而成。

1.2.3 试验方法 试验设单作玉米(盆内栽植 2 棵玉米)、单作马铃薯(盆内栽植 2 棵马铃薯)、间作(盆内栽植玉米马铃薯各一棵)三个处理,每处理 16 盆。

选取大小一致的马铃薯种薯,用 1.25% 次氯酸钠消毒 5 mins,蒸馏水漂洗后,于 2013 年 4 月 28 日在沙床进行育苗;DAS(Day after seeding,马铃薯播种后天数)10 日,将 12 kg 充分干燥的栽培基质装入盆中,分别选取大小一致的马铃薯种苗,及饱满且经过消毒处理(方法同马铃薯种薯)的玉米种子,移栽或播种于盆内;盆内两个栽培位置对称分布于盆圆心两侧且距离盆圆心 10 cm。所有盆分三行摆放,行向为南北向,盆间距 50 cm,行间距 1.5 m,以减小互相遮挡,尽可能地保持各盆各植株的光照背景一致。DAS20 日对各盆加盖板(正方形泡沫板,边长大于盆上口直径;板上留直径为 3 cm 的圆形种植孔以使植株通过)使土壤水分只受作物蒸腾影响,以便于对蒸腾水分进行研究^[22]。在玉米播种时(亦为马铃薯移栽时)对各处理施入尿素 $6 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、过磷酸钙 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、硫酸钾 $5 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,在玉米大喇叭口期(马铃薯为现蕾期)对各处理追施尿素 $5 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。

保持每日的起始土壤含水量为栽培基质饱和和重量含水量的 50%(环刀法^[23]测定的栽培基质饱和和重量含水量为 64.8%;预备试验表明,土壤含水量低于饱和和重量含水量的 40% 时,植株会因缺水而死亡);从 DAS20 日起,每 8 日为一个周期。周期首日 8:00 校正各盆土壤含水量为饱和含水量的 50%,具体为,首先计算各处理土壤含水量为饱和含水量 50% 时的盆总重(W1), $W1 = 12 \text{ kg}$ (介质充分干燥后重量) + $12 \text{ kg} \times 64.8\%$ (栽培基质饱和重量含水量) $\times 50\% + W2$ (植株重量,每周每处理每作物采集一棵样株,清洗干净称量鲜重),再对各盆称重得到 W3,之后对各盆加入 W1 - W3 的水量。周期第 2 日 8:00 计算各处理的日用水量,具体为,对各盆称重并按处理平均后得到 W4,各处理的 W1 - W4 即为各处理的日用水量。周期第 2 - 8 日的 8:00 按 W1 - W4 的水量对各处理进行水分补充以使土壤水分恢复至 50%。因为各盆每天的蒸腾量取决于植株长势和天气状况,所以 W1 - W4 的加水量能否将周

期第 2－8 日的土壤含水量恢复至 50%，取决于周期首日的植株长势与天气状况能否代表周期第 2－8 日；尽管可以假设周期内植株长势变化不大，但是周期内的天气状况会有变化且难以控制，会导致天气变化时，W1－W4 的加水量可能不能使土壤含水量实现 50%，因此实际土壤含水量是围绕 50% 波动的一个范围值。

1.2.4 数据采集 各周期日均蒸腾量 = [W1－W3 (下一观测周期) + 7 × (W1－W4)]/8。

生育期总蒸腾量 = 各周期日均蒸腾量的平均值 × 水分控制总天数(80 日)。

生物量：DAS100 日(马铃薯为收获期，玉米为灌浆成熟期)同时收获玉米和马铃薯，于烘箱 80℃ 条件下烘干至恒重后称量。

蒸腾效率：生物量/生育期总蒸腾量。

1.3 数据分析

作物蒸腾量：采用作物生物量与蒸腾系数的乘积计算大田试验中各处理蒸腾量^[24]，公式为：

$$WU = B_m \times TC_m + B_p \times TC_p$$

式中，WU 表示蒸腾量，B_m 表示各处理玉米生物量，B_p 表示各处理马铃薯生物量；TC_m 表示玉米蒸腾系数，TC_p 表示马铃薯蒸腾系数，为盆栽试验所得到的玉米和马铃薯蒸腾效率的倒数。计算单作蒸腾量时，只输入相应作物的蒸腾系数和单作时生物量；计算间作蒸腾量时，输入两种作物的蒸腾系数及间作时的生物量。

单作的加权平均蒸腾量：采用 Morris 公式^[11]计算单作的加权平均蒸腾量，其意义为与间作数量相同的玉米和马铃薯在单作条件下的蒸腾用水量，公式为：

$$WU_{as} = R_m \times WU_{ms} + R_p \times WU_{ps}$$

式中，WU 表示蒸腾量，下标 as 表示单作加权平均值，ms 表示单作玉米，ps 表示单作马铃薯；R_m = M/(M + P)，R_p = P/(M + P)，其中，R_m 和 R_p 分别为玉米和马铃薯在间作中的比例，M 为间作玉米密度与单作玉米密度比值，P 则为间作马铃薯密度与单作马铃薯密度比值。

单作的加权平均蒸腾效率：采用 Morris 公式^[11]计算单作的加权平均蒸腾效率，其意义为与间作数量相同的玉米和马铃薯在单作条件下的蒸腾效率，公式为：

$$WUE_{as} = R_m \times WUE_{ms} + R_p \times WUE_{ps}$$

式中，WUE 表示蒸腾效率，其余字母意思同公式“单作的加权平均蒸腾量”。

种间相对竞争力：采用相对竞争能力参数(RC，

relative competitive ability)^[25] 评估玉米和马铃薯对水分资源的竞争能力，公式为：

$$RC = \frac{B_{mi} \times B_{ps}}{B_{ms} \times B_{pi}}$$

式中，B 表示作物生物量，下标 s 表示单作，i 表示间作，m 表示玉米，p 表示马铃薯。当 RC > 1 时，玉米的相对竞争能力比马铃薯强，反之则马铃薯比玉米有竞争优势。

间作产量优势评估：采用土地当量比(LER，land equivalent ratio)衡量间作产量优势^[26]，公式为：

$$LER = \frac{B_{mi}}{B_{ms}} + \frac{B_{pi}}{B_{ps}}$$

公式中各字母意思同种间相对竞争力计算公式。当 LER > 1 时，间作有产量优势。

数据分析：采用 SPSS19.0 对所有指标进行处理均值间的多重比较(LSD 法)，显著水平均为 P < 0.05，对方差不齐的变量进行自然对数转换，但文中显示的均值为实测值；对 RC 和 LER 进行单样本双尾 T 测验，检验值为 1。

2 结果与分析

2.1 大田试验

2.1.1 土壤含水量 土壤含水量是影响作物蒸腾量的重要因素。6 月中旬时，不论单作和间作，玉米的土壤含水量均显著高于马铃薯，而 8 月中旬时则反之(表 1)。在田间降雨及土壤质地基本一致(意味着田间各处深层渗漏也基本一致)的情况下，田间不同区域的土壤含水量差异主要受作物蒸腾差异和土壤蒸发差异两方面影响。就蒸腾而言，因为没有出现水分限制时，植物群落的蒸腾量与群落总叶面积指数成正比^[27]，所以，6 月中旬时，马铃薯叶面积指数高于玉米，就说明马铃薯蒸腾量较大，而 8 月中旬时则反之(表 1)。就蒸发而言，6 月中旬时，玉米种植区域的土壤蒸发速率显著高于马铃薯，8 月中旬时则反之(表 1)。可以看出，作物之间的蒸腾差异趋势和蒸发差异趋势相反，这意味着它们对土壤含水量差异的影响趋势也相反。但是，实际的土壤含水量差异趋势，与蒸腾差异趋势一致，这就说明，作物之间的土壤含水量差异主要受它们之间的蒸腾量差异影响。

2.1.2 蒸腾量 从图 1 可以看出，间作的蒸腾量 4 424.07 t·hm⁻² 显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾量的加权平均值 3 612.27 t·hm⁻² (P < 0.001)，这说明同样数量的玉米马铃薯在间作时能够相对单作

增加蒸腾量。此结果和玉米与马铃薯在同一时期的土壤含水量不同(表 1)有关,即在间作中,含水量较高区域的土壤水分,能够被相邻的处于含水量较低区域的作物所利用。

表 1 不同种植方式的土壤含水量、叶面积指数和土壤蒸发速率比较(均值 ± 标准误)

处理 Treatment	土壤含水量/v% Soil moisture content		叶面积指数 Leaf area index		土壤蒸发速率/(g·cm ⁻² ·d ⁻¹) Soil evaporation rate	
	6 月中旬 Mid - June	8 月中旬 Mid - August	6 月中旬 Mid - June	8 月中旬 Mid - August	6 月中旬 Mid - June	8 月中旬 Mid - August
单作玉米 Sole maize	33.94 ± 0.5 b	43.43 ± 1.81 a	1.25 ± 0.22 b	6.3 ± 0.31 a	34.8 ± 3.3 a	18.85 ± 2.05 c
单作马铃薯 Sole potato	25.41 ± 0.32 c	46 ± 2.31 a	7.03 ± 0.46 a	—	11.6 ± 0.1 b	47.85 ± 0.95 a
间作玉米 Intercropping maize	37.03 ± 0.8 a	47.95 ± 2.75 a	1.52 ± 0.19 b	6.57 ± 0.66 a	33.94 ± 1.53 a	16.54 ± 1.31 c
间作马铃薯 Intercropping maize	26.56 ± 1.54 c	52.69 ± 0.66 a	6.47 ± 0.24 a	—	13.87 ± 2.33 b	30.62 ± 1 b
<i>F</i>	38.103	3.706	112.182	0.143	33.589	103.728
<i>P</i>	< 0.001	0.061	< 0.001	0.725	< 0.001	< 0.001

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, LSD 法);8 月中旬时,马铃薯叶片已总体凋萎,所以未观测其叶面积指数。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, LSD tests); In mid-August, the LAI of potato was not observed because the leaf of potato had withered.

2.1.3 产量和生物量 间作产量和生物量的土地当量比(LER)均大于 1(表 2),这说明间作表现了产量优势。间作的蒸腾量相对于单作增加是间作产量优势形成的重要原因之一。尽管间作玉米的株数与单作玉米一致,但是间作玉米会受到间作马铃薯的竞争抑制^[16],可能是因此,间作玉米的产量和生物量小于单作玉米。

2.2 盆栽试验

2.2.1 蒸腾量 间作的蒸腾量在多数观测周期都显著或明显大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾量的加权平均值(图 2),因此间作的生育期总蒸腾量 51.79 kg·盆⁻¹也显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾量的加权平均值 48.36 kg·盆⁻¹(图 3, $P = 0.011$),这说明间作能够提高作物蒸腾量。此结果与玉米和马铃薯在同一时期的蒸腾量不同有关,即玉米蒸腾量在 DAS52 日之前显著小于马铃薯($P < 0.05$),在 DAS52 日之后显著大于马铃薯($P < 0.05$)(图 2);进而,两作物在同一时期的蒸腾量不同会导致其土壤含水量不同(盆栽试验已消除蒸发,土壤含水量主要受作物蒸腾影响);在间作中,含水量较高区域的土壤水分能被含水量较低区域的植株所利用,从而有利于间作的蒸腾量相对单作增加。

2.2.2 生物量 间作玉米生物量显著大于单作玉米($P < 0.001$),而间作马铃薯生物量则显著小于单作马铃薯($P = 0.007$)(图 4A),因此间作的种间相对竞争能力参数(RC) > 1(图 4B, $P < 0.001$)。这说明在间作中,玉米的资源竞争能力大于马铃薯,进而说明玉米会在间作的种间水分竞争中占据优势地位。用生物量计算得到的间作土地当量比(LER) > 1(图 4B, $P < 0.001$),这虽然与用经济产量计算有所不同,但也可以从物质产出上说明间作表现了增产优势。间作所表现的增产优势,应该和间作能够提高

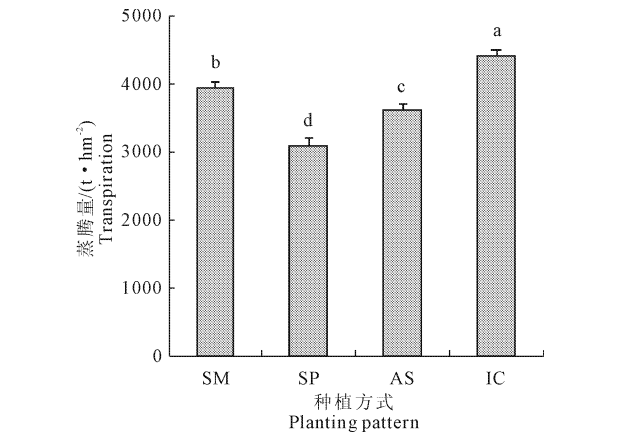


图 1 不同种植方式的作物蒸腾量比较(均值 ± SE)
Fig.1 Comparisons of crop transpiration among different planting patterns (Means ± SE)

注:SM = 单作玉米,SP = 单作马铃薯,AS = 单作平均,IC = 间作;
图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, LSD 法),下同。
Note: SM = Sole Maize, SP = Sole Potato, AS = Average of Sole Crop, IC = Intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P < 0.05$, LSD tests), and hereinafter.

作物蒸腾量有关(图 3),除此之外,也和间作能够提高作物的光照和养分等其它资源利用量有关。

表 2 不同种植方式的作物产量和生物量及间作土地当量比(均值 ± 标准误)
Table 2 The yield and biomass by different planting patterns and the LER of intercropping (means ± S.E.)

处理 Treatment	玉米 Maize		马铃薯 Potato		LER	
	产量/(t·hm ⁻²) Yield	生物量/(t·hm ⁻²) Biomass	产量/(t·hm ⁻²) Yield	生物量/(t·hm ⁻²) Biomass	产量 Yield	生物量 Biomass
单作 Sole cropping	14.04 ± 0.10 a	21.45 ± 0.26 a	9.51 ± 0.05 a	11.04 ± 0.12 a		
间作 Intercropping	10.31 ± 0.12 b	15.84 ± 0.12 b	3.90 ± 0.06 b	5.36 ± 0.03 b	1.145 ± 0.016	1.225 ± 0.012
F	62.779	40.711	94.675	135.542		
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	= 0.003	<0.001

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, LSD 法),表中产量和生物量都为干物质量。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, LSD tests); In the table, both yield and biomass are based on dry mass weight.

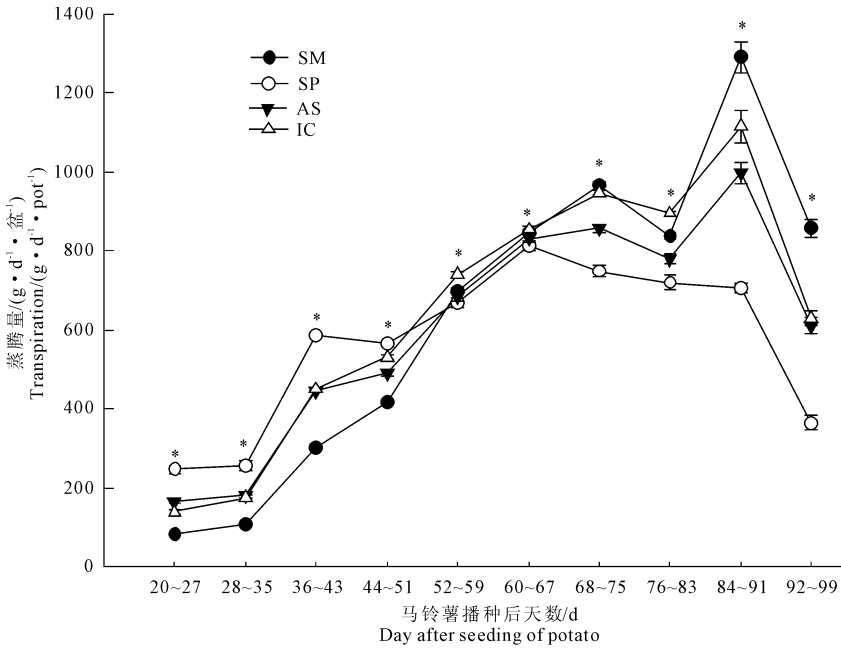


图 2 不同种植方式的蒸腾量比较(均值 ± SE)
Fig.2 Comparisons of crop transpiration among different planting patterns (Means ± SE)
注:图中 * 表示处理间差异显著($P < 0.05$, LSD 法)。
Note: * indicate significant differences among treatments($P < 0.05$, LSD tests).

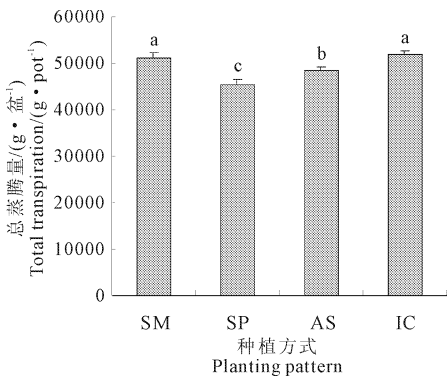


图 3 不同种植方式的作物生育期总蒸腾量比较(均值 ± SE)
Fig.3 Comparisons of crop total transpiration during growth period among different planting patterns (Means ± SE)

2.2.3 蒸腾效率 间作的蒸腾效率 $4.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著大于单作玉米和单作马铃薯蒸腾效率的加权平均值 $4.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5, $P < 0.001$),这说明间作能够提高作物的蒸腾效率。Morris 曾就此提出一种假设:如果某种作物既在间作的种间水分竞争中占据优势地位(说明该作物蒸腾量在间作总蒸腾量中占较大比例),又具有较高的蒸腾效率,那么间作的蒸腾效率就会高于单作加权平均^[11]。因此,玉米马铃薯间作的蒸腾效率增加,与玉米既在间作的种间水分竞争中占据优势地位(图 4B),又具有相对马铃薯为高的蒸腾效率(图 5, $P < 0.001$)有关。

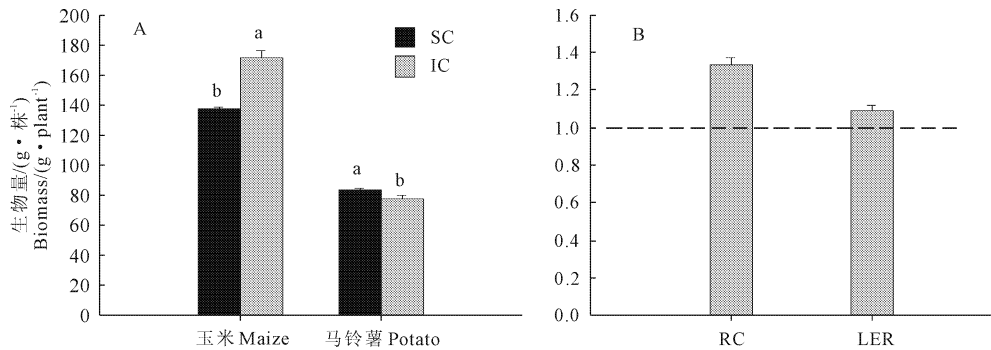


图 4 不同种植方式的作物生物量及间作的 RC 和 LER(均值 ± SE)

Fig.4 Crop biomass by different planting patterns and the RC and LER of intercropping (Means ± SE)
注:SC= 单作,IC= 间作,RC= 种间相对竞争能力,LER= 土地当量比。
Note: SC= Sole Crop, IC= Intercropping, RC= relative competitive ability, LER= land equivalent ratio.

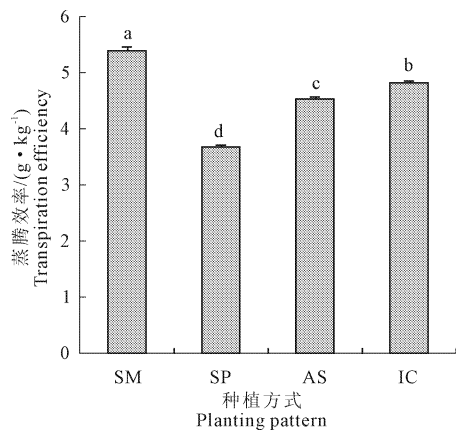


图 5 不同种植方式的作物蒸腾效率比较(均值 ± SE)
Fig.5 Comparisons of crop transpiration efficiency among different planting patterns (Means ± SE)

3 讨 论

作物蒸腾量与作物产量密切相关,本研究以玉米与马铃薯间作为研究对象,结合大田和盆栽试验,发现间作能够提高作物蒸腾量(图 1 ~ 图 3)。Walker^[12]等人在玉米和大豆间作的研究中也发现,间作的蒸腾量相对单作显著增加。但是,该研究中的蒸腾量是通过模型估算得到,并非实测数据。因此,本研究通过直接证据说明了间作能够提高作物蒸腾量,从而在水分利用量方面解释了间作为何能表现增产优势。

在结果与分析部分已提及,间作蒸腾量的提高与两作物在同一时期的蒸腾量不同(表 1,图 2)有关。进一步分析,玉米和马铃薯同一时期蒸腾量不同的原因应该是:相对于玉米,马铃薯的块茎养分有利于其根系和地上茎叶较早形成^[28-29],以及马铃薯的播种时间较早,这会使得马铃薯植株在共生期

早期总体较大,所以其蒸腾量在 DAS52 日之前显著大于玉米(图 2);之后,由于在物种特性上玉米植株高大,其植株大小会反超马铃薯,所以其蒸腾量在 DAS52 日后显著大于马铃薯(图 2)。因此,在间作的生产实践中,可以将不同熟期的作物进行搭配,或者将两作物的播种和收获时间错开,以使两作物在同一时期的蒸腾量出现差异,从而有利于发挥间作提高作物蒸腾量的优势。

除上述原因外,间作蒸腾量的提高也可能与以下原因有关:其一,玉米和马铃薯主要根系分布层面不同^[14],所以两作物间作时能够相对单作较多地占有土壤空间,进而能较多地利用土壤水分;其二,间作,尤其是添加间作,能够增加作物群体的覆盖度,从而减少蒸发^[30]、径流^[31]等水分损耗,增加土壤可用水分;其三,间作群体的“波浪形”冠层结构能够增加其与空气的接触面,同时提高空气流通速度,从而有利于叶片表面水分散失^[32];其四,由于作物的蒸腾过程一定程度地受到光的诱导,对于喜光且蒸腾量较大(图 3)的玉米来说,间作后下部叶片能够较好地吸收光照,促进气孔开启,从而利于加快蒸腾过程。

作物蒸腾效率也与作物产量密切相关,本研究发现,玉米马铃薯间作能够提高作物的蒸腾效率(图 5)。冯良山^[13]在花生和谷子间作的研究中也发现,间作的蒸腾效率能够相对单作上升。但是,该研究的蒸腾效率是在个别时期基于个别叶片观测,不能反映全株在整个生育期的蒸腾效率。因此,本研究较完整地说明了间作能够提高作物蒸腾效率,从而在水分利用效率方面解释了间作为何能表现增产优势。

在结果与分析部分已提及,间作蒸腾效率的提高与蒸腾效率较高的玉米(图 5)在种间的水分竞争

中占据优势地位有关(图 4)。进一步分析,玉米的蒸腾效率大于马铃薯的原因可能是,玉米是 C4 植物,马铃薯是 C3 植物,一般情况下,C4 植物的蒸腾效率都高于 C3 植物^[33];玉米之所以在种间水分竞争中占据优势地位,是因为在物种特性上,玉米的植株高大且根系发达,对土壤水分的蒸腾拉力和获取能力更大。因此,在间作的生产实践中,可以选择植株高大且为 C4 植物的作物,与植株矮小且为 C3 植物的作物进行搭配,以利于发挥间作提高作物蒸腾效率的优势。

作物的产量等于作物蒸腾量与蒸腾效率的乘积,本研究同时研究了间作对作物蒸腾量和蒸腾效率的影响,发现在整体上两者得到了协同提高(图 3、5)。尽管已有研究已经探讨了间作的蒸腾量和蒸腾效率,并发现两者均呈现增加,但是蒸腾量增加和蒸腾效率增加是在不同的研究中被报道。这并不能说明二者会同时增加,因为蒸腾量和蒸腾效率会相互影响,其中一项的升高有可能导致另一项的降低。虽然蒸腾量或蒸腾效率的增加均有利于间作增产,但是因为作物产量受蒸腾量与蒸腾效率的共同影响,其中一项的单独提高并不能证明间作必然增产。因此,本研究所发现的间作蒸腾量和蒸腾效率协同提高,能够完整而有力地证实间作高效利用水分资源,较全面地从水分利用角度说明了间作的增产机制。

间作蒸腾量和蒸腾效率的协调提高是一个值得探讨的现象。总体上,这可能与光照、养分等资源是否为作物生长的限制因子有关。当养分和光照等资源不是作物生长的限制因子时,由于水分是作物养分吸收的媒介^[10],以及蒸腾会影响气孔开度进而会影响光合作用,所以作物的蒸腾量增加能够促进作物吸收土壤养分和利用光照。因此,作物的蒸腾量增加不仅直接有利于作物产量增加,也能够通过提高养分和光照利用量而间接地有利于作物产量增进,这便有可能使得作物的蒸腾效率上升。但是,当养分和光照等资源限制效应较大时,即便作物的蒸腾量增加,作物的产量也不会明显增加,这便有可能导致作物的蒸腾效率下降。在间作中,由于作物间在时间、空间生态位上存在差异^[2],同时种间还存在各种互利过程,如间作中分泌有机酸作物的土壤磷活化作用^[34]、豆科植物的固氮作用^[35]等,养分和光照等环境因子不容易成为限制因子,因此,间作蒸腾量和蒸腾效率能够协同提高。

4 结 论

玉米和马铃薯在同一时期的蒸腾量存在差异,

即在马铃薯初花期和玉米小喇叭口期之前,玉米的蒸腾量显著小于马铃薯,该时期之后,玉米的蒸腾量显著大于马铃薯,这会导致两作物种植区域之间的土壤含水量差异,进而使得在间作中,一种作物可以利用另一种作物种植区域的较多土壤水分,因此玉米马铃薯间作可以提高作物群体蒸腾量;同时,由于玉米既具有较高的蒸腾效率,又在种间水分竞争中占据优势地位,所以玉米马铃薯间作可以提高作物群体蒸腾效率;蒸腾量和蒸腾效率的协同提高使得该间作模式可以高效利用水分资源,从而有利于其表现增产优势。

参 考 文 献:

- [1] Anil L, Park J, Phipps R H, et al. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK[J]. Grass and Forage Science, 1998,53(4):301-317.
- [2] Lithourgidis A S, Dordas C A, Damalas C A, et al. Annual intercropping: an alternative pathway for sustainable agriculture[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011,5(4):396-410.
- [3] Gao Ying, Wu Pu-te, Zhao Xi-ning, et al. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize intercropping system in an arid region of northwestern China[J]. Field Crops Research, 2014,167:19-30.
- [4] Kaur Navneet, Bhullar Makhan S, Gill Gurjeet. Weed management options for sugarcane-vegetable intercropping systems in north-western India[J]. Crop Protection, 2015,74:18-23.
- [5] Kamal M, Hadi M S, Hariyanto E. Grain yield and, nutrient and starch content of sorghum (Sorghum bicolor) genotypes as affected by date of intercropping with cassava in Lampung, Indonesia[J]. Journal of ISSAAS (International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences), 2014,20(1):64-76.
- [6] Altieri Miguel A, Toledo Victor M. The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants[J]. Journal of Peasant Studies, 2011,38(3):587-612.
- [7] Kim Dong Gill. Estimation of net gain of soil carbon in a nitrogen-fixing tree and crop intercropping system in sub-Saharan Africa: results from re-examining a study[J]. Agroforestry Systems, 2012,86(2):175-184.
- [8] Launay Marie, Brisson Nadine, Satger Sylvain, et al. Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach[J]. European Journal of Agronomy, 2009,31(2):85-98.
- [9] Mucheru - Muna Monicah, Pypers Pieter, Mugendi Daniel, et al. A staggered maize-legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of Central Kenya[J]. Field Crops Research, 2010,115(2):132-139.
- [10] Locke Anna M, Ort Donald R. Leaf hydraulic conductance declines in coordination with photosynthesis, transpiration and leaf water status as soybean leaves age regardless of soil moisture[J]. Journal of Experimental Botany, 2014,65(22):6617-6627.
- [11] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in inter-

- cropping: water[J]. *Field Crops Research*, 1993,34(3):303-317.
- [12] Walker S, Ogindo H O. The water budget of rainfed maize and bean intercrop[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003,28(20):919-926.
- [13] 冯良山.花生谷子间作水分养分高效利用机制研究[D].长春:沈阳农业大学,2013.
- [14] Mushagalusa Gustave Nachigera, Ledent Jean Francois, Draye Xavier. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: effects on growth and yield[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008,64(2):180-188.
- [15] He Xia-hong, Zhu Shu-sheng, Wang Hai-ning, et al. Crop diversity for ecological disease control in potato and maize[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010,1(1):45-50.
- [16] Wu Kai-xian, Fullen M A, An Tong-xin, et al. Above- and below-ground interspecific interaction in intercropped maize and potato: a field study using the 'target' technique[J]. *Field Crops Research*, 2012,139:63-70.
- [17] Kour P, Kumar A, Sharma B C, et al. Effect of weed management on crop productivity of winter maize (*Zea mays*) + potato (*Solanum tuberosum*) intercropping system in Shiwalik foothills of Jammu and Kashmir[J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2014,59(1):65-69.
- [18] Ebwongu M, Adipala E, Ssekabembe C K, et al. Effect of intercropping maize and solanum potato on yield of the component crops in central Uganda[J]. *African Crop Science Journal*, 2001,9(1):83-96.
- [19] Szumigalski Anthony R, Van Acker Rene C. Land equivalent ratios, light interception, and water use in annual intercrops in the presence or absence of in-crop herbicides[J]. *Agronomy Journal*, 2008,100(4):1145-1153.
- [20] Daamen Carl C, Simmonds L P, Wallace J S, et al. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993,65(3):159-173.
- [21] Plauborg Finn. Evaporation from bare soil in a temperate humid climate-measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995,76(1):1-17.
- [22] Ray Jeffery D, Sinclair Thomas R. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998,49(325):1381-1386.
- [23] 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,1978:523-524.
- [24] 彭守璋,赵传燕,彭焕华,等.黑河下游怪柳种群地上生物量及耗水量的空间分布[J].*应用生态学报*,2010,21(8):1940-1946.
- [25] 王秋杰,曹一平,张福锁,等.间套作研究中的统计分析方法[J].*植物营养与肥料学报*,1998,4(2):176-182.
- [26] Oyejola B A, Mead R. Statistical assessment of different ways of calculating land equivalent ratios (LER)[J]. *Experimental Agriculture*, 1982;18(2):125-138.
- [27] Medina E, Klinge H. *Physiological Plant Ecology*[M]. IV. Berlin Heidelberg: Springer, 1983:281-303.
- [28] Iwama K, Nakaseko K, Gotoh K, et al. Varietal differences in root system and its relationship with shoot development and tuber yield[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1979;48(3):403-408.
- [29] Iwama Kazuto. Development of nodal and lateral roots in potato under field conditions[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Hokkaido University*, 1998;68(1):33-44.
- [30] Sharaiha Ramzi K, Ziadat Feras M. Alternative cropping systems to control soil erosion in the arid to semi-arid areas of Jordan[J]. *Arid Land Research and Management*, 2008;22(1):16-28.
- [31] Ghanbari Ahmad, Dahmardeh Mehdi, Siahsharati Ali, et al. Effect of maize (*Zea mays* L.) – cowpea (*Vigna unguiculata* L.) intercropping on light distribution, soil temperature and soil moisture in arid environment[J]. *J. Food Agric. Environ*, 2010;8(1):102-108.
- [32] Morris R A, Villegas A N, Polthanee A, et al. Water use by monocropped and intercropped cowpea and sorghum grown after rice[J]. *Agronomy Journal*, 1990;82(4):664-668.
- [33] Way D A, Katul G G, Manzoni S, et al. Increasing water use efficiency along the C3 to C4 evolutionary pathway: A stomatal optimization perspective[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014,65(13):3683-3693.
- [34] Wang Z, Bao X, Li X, et al. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade[J]. *Plant and Soil*, 2015,391(1-2):265-282.
- [35] Cong W, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping affects the rate of decomposition of soil organic matter and root litter[J]. *Plant and Soil*, 2015,391(1-2):399-411.