

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19332

间作玉米马铃薯土壤水氮协同吸收特征研究

刘英超^{1, 2}, 汤利², 郑毅^{2*}

(1. 昆明学院科技处, 云南 昆明 650214; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 土壤水氮协同吸收对玉米、马铃薯产量维持具有重要作用。本研究通过盆栽试验, 采用滴灌补水方式, 动态定量监测了玉米 (*Zea mays*) 马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 间作条件下, 作物不同生育期表观耗水量变化和水分利用差异, 并通过各生育期表观耗水量和植株氮含量变化, 分析了水分吸收与氮素在植株累积中的关系。结果表明, 玉米马铃薯间作有明显产量优势, 土地当量比 (LER) 为 1.36, 玉米种间竞争力强于马铃薯 (ARF>0)。与单作相比, 间作玉米总表观耗水量减少 16.67%, 间作马铃薯总表观耗水量增加 15.44%, 两种间作作物表观耗水量差异不显著。作物整个生育期, 与单作相比, 间作玉米氮素累计吸收量减少 96.30%, 间作马铃薯减少 83.66%, 间作作物中, 玉米高于马铃薯 151.53%。全生育期作物表观耗水量与氮素累积吸收量均呈显著正相关关系, 且越到后期越明显, 其中, 抽穗至成熟期为玉米水-氮协同吸收关系最紧密时期, 单作玉米相关系数 0.717, 间作玉米相关系数 0.814, 块茎形成期至淀粉积累期为马铃薯水-氮协同吸收最明显时期, 单间作马铃薯相关系数分别达到 0.808 和 0.875。综上, 玉米马铃薯间作促进作物水-氮协同吸收作用, 且随生育期推移越显著。

关键词: 玉米; 马铃薯; 间作; 表观耗水量; 氮吸收量

间作由于具有充分利用土地、水分和养分资源等特点, 已被世界各国广泛采用^[1-4]。近年来, 不同间作体系土壤水分利用有过大量研究报道。周绍松等^[5]对大麦蚕豆间作体系土壤含水量研究表明, 大麦苗后期至抽穗期, 蚕豆土壤含水量下降比大麦快; 而在苗期前期和成熟期, 土壤含水量下降比大麦慢。张劲松等^[6]对麦田间作系统研究表明, 间作小麦土壤水分利用率平均高于单作 4.0% ~ 8.7%, 小麦水分利用率的提高与间作系统小麦蒸腾降低和土壤水分增加效应有关。侯建伟等^[7]研究表明, 苕子和莠麦与马铃薯间作有利于整个间作系统农田生产力和水分利用效率的提高, 且对苕子和莠麦的提升效果更佳。叶优良^[8]对不同氮水平不同品种小麦与玉米间作对水分的利用特征研究结果表明, 与单作相比, 在 300 kg·hm⁻² 氮水平下, 间作水分用量 (WU) 减少 1.09% ~ 6.96%, 水分利用效率 (WUE) 增加

10.76% ~ 29.56%。但是, 有关禾本科薯类间作种植模式下的土壤水分养分利用关系的研究却少有报道。玉米马铃薯间作是禾本科与薯类间作经典种植模式, 也是中国西南地区常用种植模式, 在农业生产中具有重要地位。因此, 本试验结合中国西南地区农业生产实际, 以间套作土壤水分利用已有研究为基础, 探究玉米马铃薯间作体系不同生育期作物表观耗水量变化规律及水分养分利用关系, 对合理利用水资源, 提高作物水分养分利用效率具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点设在云南农业大学植物营养系温室 (102° 45' E, 25° 8' N), 海拔 1 891 m。

1.2 供试材料

土壤: 山原红壤, 基本理化形状为: 有机质 22.8 g·kg⁻¹, pH 值 6.5, 全氮 1.61 g·kg⁻¹, 全磷 2.78 g·kg⁻¹, 全钾 25 g·kg⁻¹, 碱解氮 100.38 g·kg⁻¹, 有效磷 15.17 g·kg⁻¹, 速效钾 110.71 g·kg⁻¹。

作物: 玉米 (*Zea mays*) - 耕源 135; 马铃薯 (*Solanum tuberosum*) - 会泽 2 号。

肥料: 氮肥 - 尿素, 磷肥 - 普钙, 钾肥 - 硫酸钾。

1.3 试验设计

试验设玉米单作、马铃薯单作、玉米马铃薯间

收稿日期: 2019-07-25; 录用日期: 2019-09-17

基金项目: 云南省地方本科高校基础研究联合专项资金项目 [2019FH001 (-056)]; 国家自然科学基金项目 (31460551、41361065、31260504); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2020J0524); 昆明学院人才引进科学研究启动项目 (YJL2005)。

作者简介: 刘英超 (1988-), 女, 黑龙江人, 讲师, 博士, 主要从事间作水分利用与养分吸收关系研究。E-mail: liuyingchao_1988@163.com。

通讯作者: 郑毅, E-mail: yzheng@ynau.edu.cn。

作3种植方式,每个处理3次重复,分5个生育期采样,共计45盆。间作每盆种植2株玉米、2株马铃薯,单作玉米每盆4株,单作马铃薯每盆4株。

1.4 种植与管理

试验所用塑料盆规格为:上部直径46 cm、下部直径30 cm、高38 cm,每盆装土16 kg,分两行种植玉米和马铃薯。试验氮肥每盆用量为5.15 g,磷肥每盆用量为15 g,钾肥每盆用量为4.44 g,N、P、K施肥比例为1:1:1(按元素计算);其中,氮肥分两次施用,第一次作为基肥,第二次在玉米拔节期施用,磷钾肥全部作为基肥一次施用。

试验采用滴灌法浇水,将滴管一端置于试验盆中间,另一端与滴罐(带有刻度的塑料瓶)相连,由滑轮调整滴管滴速,每个处理24 h均匀滴加水分,并根据作物不同生育期需水量调整供水量,保持每盆土壤含水量达到田间持水量70%。每天9:00记录滴灌水分消耗量及室内温湿度,19:00用土壤水分测定仪(TZS-I型)测定每个处理中土壤含水量。其中,单作测定试验盆中间位置土壤含水量,间作分别测定同种作物一侧离盆边11.5 cm处土壤含水量,测定深度均为15 cm。

1.5 样品采集与测定

分别于玉米、马铃薯每个生育期第10 d进行植株样品采集,即玉米幼苗期、拔节期、抽穗期、乳熟期和成熟期(马铃薯对应生育期分别为幼苗期、发棵期、块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期),植株称重后烘干杀青,采用凯氏定氮法分别测定作物根、茎、叶及果实内氮素含量^[9],收获后测定作物产量。

1.6 数据统计与分析

1.6.1 间作优势评价

应用土地当量比(LE_R)作为衡量间作产量优势指标^[10]。

$$LE_R = LE_{Rm} + LE_{Rp}$$

$$LE_{Rm} = YIM/YMM$$

$$LE_{Rp} = YIP/YMP$$

其中:YIM和YIP分别代表间作总面积上玉米、马铃薯产量;YMM和YMP分别代表单作玉米和单作马铃薯产量;当LE_R>1时,表明间作有优势;当LE_R<1时,为间作劣势。

1.6.2 种间相对竞争力

应用种间相对竞争力衡量间作体系作物竞争资

源能力^[11-12]。

$$AMP = YIM / (YMM \cdot I) - YIP / (YMP \cdot II)$$

式中:AMP为玉米相对马铃薯的资源竞争力;YIM和YIP分别代表间作总面积上玉米和马铃薯产量;YMM和YMP分别代表单作玉米和单作马铃薯产量;I和II分别为间作种植体系玉米马铃薯所占比例,I=1/2,II=1/2。当AMP>0,表明玉米竞争能力强于马铃薯;当AMP<0,表明玉米竞争能力弱于马铃薯。

1.6.3 表观耗水量计算

表观耗水量(mL)=浇水量(mL)-[土壤含水量(mL)-土壤初始含水量(mL)];土壤初始含水量为播种前的土壤水分含量,即田间持水量的70%左右。本试验中土壤的初始含水量为35.5%,折合为5 680 mL。该耗水量包括作物蒸腾和土壤蒸发消耗的水分。单间作物初始加水量相同,根据实测单间作物土壤含水量数值计算表观耗水量,并根据不同生育期的天数,求得每个生育期表观耗水量的平均值。

1.6.4 植株氮素吸收量计算

氮素吸收量(g)=生物量(kg)×植株全氮量(g/kg);生物量为各生育期作物净生物量,即各时期生物量与相邻生育期生物量差值,植株全氮量为各生育期测定植株体内全氮量。

1.6.5 试验数据

采用软件SPSS 17.0及Excel 2003处理,用Duncan新复极差法及T检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 作物的生物量和产量

玉米马铃薯间作体系显著提高了玉米生物学产量。试验中,与单作相比,间作玉米生物学产量提高42.68%,经济学产量提高44.39%。与单作马铃薯相比,间作生物学产量虽没有明显优势,但经济学产量提高30.70%。通过间作优势计算公式得出,玉米马铃薯间作体系土地当量比LE_R(LE_R=1.36)大于1,说明该间作体系相对单作具有产量优势,而间作体系中,与马铃薯相比,玉米种间相对竞争力ARF值(ARF=0.064)大于0,说明间作玉米对水分养分等资源的竞争力强于马铃薯。

表1 作物生物量与产量

产量	玉米		马铃薯	
	单作	间作	间作	单作
生物学产量 (g/盆)	200.40 ± 3.55 b	285.93 ± 6.48 a	105.77 ± 13.58 c	81.40 ± 12.84 c
经济产量 (g/盆)	189.49 ± 14.54 b	273.60 ± 12.61 a	103.77 ± 4.62 c	79.40 ± 3.67 c
土地当量比 (LER)		1.36		
种间竞争力 (ARF)		0.064		

注: 同行数据后不同小写字母表示处理间在 5% 水平上差异显著, 间作生物量按照每盆计算, 单作生物量按照每盆的 1/2 计算。

2.2 作物表观耗水量

2.2.1 玉米表观耗水量

表 2 表明, 随生育期变化, 无论单作还是间作, 玉米表观耗水量均先增加后减少, 单作玉米抽穗期表观耗水量达到最大值, 间作玉米拔节期表观

耗水量达到最大值。与单作相比, 全生育期间作玉米总表观耗水量减少 16.7%。除苗期和拔节期外, 其他生育期间作玉米表观耗水量均减少, 但仅在抽穗期达到显著性差异, 抽穗期间作玉米表观耗水量减少 43.9%。

表 2 玉米不同生育期表观耗水量 (mL)

	苗期	拔节期	抽穗期	乳熟期	成熟期	全生育期
MM	660.40 ± 3.91e	1 353.60 ± 5.50e	2 453.47 ± 9.80a	2 551.20 ± 3.71a	1 795.07 ± 2.04a	8 813.73 ± 26.13A
IM	754.80 ± 1.40d	2 238.40 ± 3.86b	1 705.13 ± 5.43b	1 502.47 ± 7.41c	1 353.87 ± 5.58c	7 554.20 ± 10.85B

注: MM- 单作玉米、IM- 间作玉米, 间作按照每盆计算, 单作按照每盆的 1/2 计算得出。同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平上差异显著, 下同。

2.2.2 马铃薯表观耗水量

由表 3 可以看出, 无论单作还是间作, 马铃薯表观耗水量均随生育期推移而减少, 表观耗水量最大值时期均为幼苗期。与单作相比, 除发棵期外, 间作马铃薯各生育期表观耗水量均明显增加, 幼

苗期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期分别增加 25.8%、24.3%、24.8% 和 20.5%, 全生育期总表观耗水量增加 15.4%, 说明间作马铃薯整个生育期吸收更多水分, 同时说明间作体系存在水分竞争。

表 3 马铃薯不同生育期表观耗水量 (mL)

	幼苗期	发棵期	块茎形成期	块茎增长期	淀粉积累期	全生育期
MP	1 363.20 ± 4.18a	908.13 ± 3.38c	733.60 ± 4.69d	593.50 ± 3.30e	507.70 ± 4.80e	4 376.86 ± 30.82A
IP	1 714.73 ± 4.06b	1 074.93 ± 1.40bc	911.60 ± 3.80c	740.27 ± 2.90d	611.33 ± 4.28d	5 052.84 ± 26.28B

注: MP- 单作马铃薯、IP- 间作马铃薯, 间作按照每盆计算, 单作按照每盆的 1/2 计算得出。

2.2.3 间作作物表观耗水量

由表 4 可以看出, 间作玉米表观耗水量随生育期推移先增加后减小, 拔节期最大, 苗期最小; 间作马铃薯表观耗水量随生育期推移而减少, 幼苗期最

大, 成熟期最小。间作体系中, 与玉米相比, 除幼苗期外, 其他各生育期马铃薯表观耗水量明显减少, 尤其块茎形成期、块茎增长期分别减少 87.03%、103.03%。说明玉米马铃薯体系中, 玉米消耗更多水分。

表 4 间作作物不同生育期表观耗水量 (mL)

	I	II	III	IV	V	全生育期
IM	754.80 ± 1.40d	2 238.40 ± 3.86a	1 705.13 ± 5.43b	1 502.47 ± 7.41c	1 353.87 ± 5.58c	7 554.20 ± 10.85A
IP	1 714.73 ± 4.06b	1 074.93 ± 1.40cd	911.60 ± 3.80d	740.27 ± 2.95d	611.33 ± 4.28e	5 052.84 ± 26.28A

注: IM- 间作玉米、IP- 间作马铃薯, 表中 I、II、III、IV、V 分别表示玉米苗期、拔节期、抽穗期、乳熟期、成熟期, 对应马铃薯生育期分别为幼苗期、发棵期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期; 间作按照每盆计算, 单作按照每盆的 1/2 计算得出。

2.3 作物氮素吸收量

图 1 表明, 随生育期推移, 玉米氮素累计吸收量均先增加后减少, 乳熟期为单作玉米最大氮吸收时期, 拔节期为间作玉米最大氮吸收时期。与间作相比, 除拔节期外, 单作玉米氮吸收量均明显增加; 其中, 乳熟至成熟期, 氮素吸收量分别增加 3.66 和 1.33 倍。全生育期, 单作马铃薯氮素吸收量均先增加后减少, 且不同生育期差异显著, 块茎形成期达到最大吸收值, 间作马铃薯不同生育期

氮素吸收量差异不明显。与间作相比, 幼苗期、发棵期、块茎形成期和块茎增长期单作马铃薯氮素吸收量均明显增加, 其中, 幼苗至块茎形成期, 单作马铃薯氮素吸收量分别提高 93.4%、94.1% 和 135.4%。两种间作作物中, 与间作马铃薯相比, 间作玉米氮吸收量明显提高。其中, 拔节期、抽穗期和成熟期, 间作玉米氮素累计吸收量分别提高 2.44、2.04 和 5.12 倍。

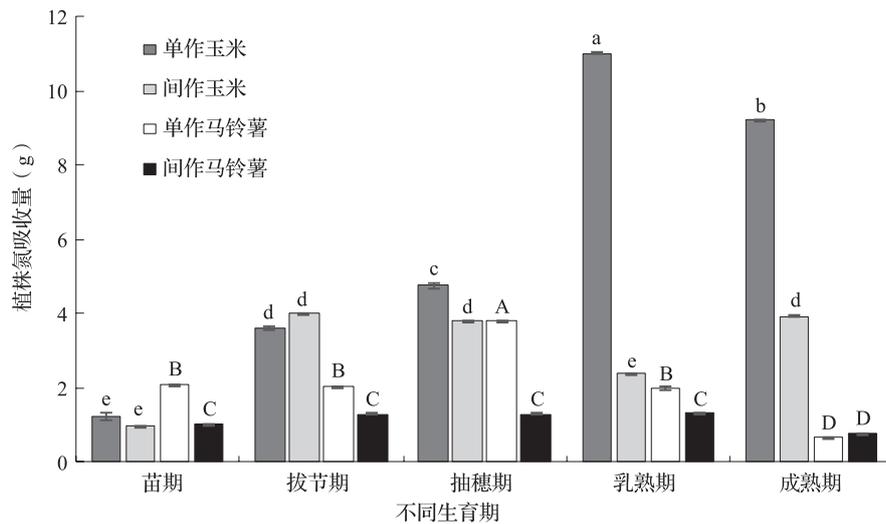


图 1 作物不同生育期氮吸收量

注: 图中为玉米生育期, 对应马铃薯生育期分别为: 幼苗期、发棵期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期。
图柱上大、小写字母不同分别表示马铃薯、玉米不同生育期单间作处理在 5% 水平上差异显著。

2.4 作物土壤水分与氮素吸收关系分析

2.4.1 玉米表观耗水量与氮吸收关系分析

由图 2 和 3 可以看出, 无论单作还是间作, 全生育期玉米表观耗水量与氮素吸收量均具有明显相关关系。单作玉米相关系数 (r 值) 为 0.701, 间作玉米相关系数 (r 值) 为 0.769。随生育期推移, 玉米表观耗水量与氮素吸收量相关关系越明显。抽穗至成熟期, 单间作玉米相关系数分别为 0.717 和 0.814, 说明单间作玉米表观耗水量与氮吸收量均具有协同吸收效应, 同时也说明, 与单作相比, 间作玉米协同吸收效应效果更明显。

2.4.2 马铃薯表观耗水量与氮吸收关系

由图 2 和 3 还可以看出, 全生育期间作马铃薯表观耗水量与氮吸收量具有明显相关关系, 且随生育期推移, 相关系数增大, 块茎增长期至淀粉积累期, 间作马铃薯表观耗水量与氮吸收量相关系数 (r 值) 为 0.875。整个生育期, 单作马铃薯表观耗水量与氮

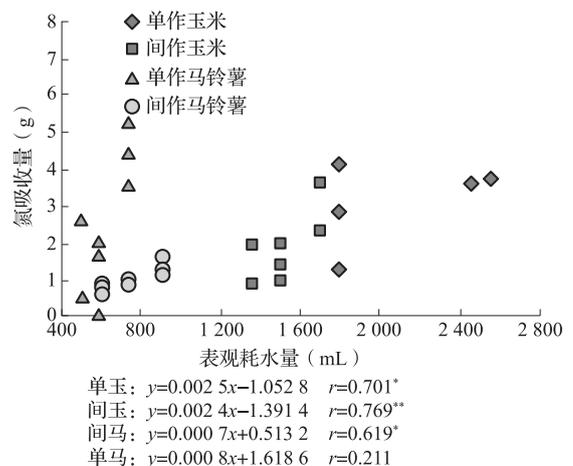


图 2 全生育期表观耗水量与氮吸收相关性分析

吸收量相关性不明显, 但随生育期推移, 表观耗水量与氮吸收量具有相关关系, 块茎增长期至成熟期, 单作马铃薯相关系数 (r 值) 为 0.808。说明与单作相比, 间作马铃薯水分和氮养分协同吸收性更明显。

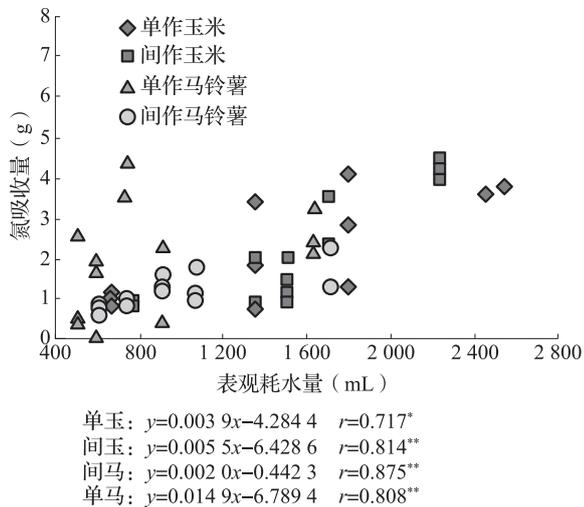


图3 生育期后期表观耗水量与氮吸收相关性分析

注：玉米抽穗至成熟期，马铃薯块茎增长至淀粉积累期。

2.4.3 间作作物表观耗水量与氮吸收关系

图2和3还表明，玉米马铃薯间作体系中，全生育期，两种间作作物表观耗水量与氮吸收量呈显著正相关关系，间作玉米马铃薯相关系数分别为0.769和0.619，随生育期变化，作物协同吸收效应越来越明显，其中，玉米抽穗至成熟期（对应马铃薯时期为块茎增长至淀粉积累期），作物表观耗水量与氮吸收量呈极显著正相关，相关系数分别达到0.814和0.875，间作玉米抽穗至成熟期达到水分养分吸收关系最紧密时期，相应地，马铃薯块茎增长长期至淀粉积累期为水氮协同吸收效果最明显时期。

3 讨论

3.1 玉米马铃薯间作生物量和产量

大量研究表明，间作可以提高作物生物量和产量^[13-14]。本试验结果表明，间作玉米生物学产量高于单作42.68%，单间作马铃薯的生物学产量差异不显著；间作玉米经济产量高于单作44.39%，间作马铃薯高于单作30.70%。已有研究表明，禾本科与豆科间作方式中，禾本科为须根系，豆科为直根系，因此二者互补可以最大限度地发挥间作优势，最终表现为增产效应^[15-17]。本试验中，玉米为禾本科，马铃薯为茄科，但该间作体系生物学产量优势（LER=1.36）和经济产量优势依然明显。这可能是由于马铃薯为直根系，玉米与马铃薯间作模式类似禾本科与豆科间作，对水分和养分的吸收利用也具有相似之处，且玉米属高秆植物，马铃薯茎

秆低伏，因此对光能、CO₂等的吸收利用具有互补优势。但玉米、马铃薯间作模式与其他豆科、禾本科间作模式在间作优势形成上究竟有哪些差异，还需要进一步讨论。

3.2 玉米马铃薯间作体系水分消耗与分配

已有研究表明，间作可以增加作物的水分利用效率^[18-20]，但有关间作作物表观耗水量研究较少。本试验结果表明，与单作相比，间作玉米表观耗水量减少，且表观耗水量最大值提前于单作，间作马铃薯表观耗水量增加，表观耗水量最大值与单作在同一时期。两种间作作物相比，除苗期外，其他生育期间作玉米表观耗水量高于间作马铃薯，尤其在乳熟期和成熟期，间作玉米表观耗水量分别高于间作马铃薯87.03%、103.03%。这可能是由于不同生育期作物需水规律不同及对水分竞争优势不同造成的^[15]。玉米苗期至拔节期，作物叶片数量少，面积小，蒸发量小，对水分需求量少，因而对水分竞争能力较弱，而同时期马铃薯为发棵期至块茎形成期，马铃薯需要大量水分以满足自身生长及蒸腾蒸发等，因此对水分竞争强于玉米。抽穗期以后，玉米需水量大，对水分竞争增强，相反，马铃薯需水量逐渐减少，对水分竞争能力也减弱^[21-23]。可见，在不影响作物生长和产量前提下，在本试验基础上，不同生育期减少间作作物供水是可行的，具体供水数量还需进一步试验验证。

3.3 玉米马铃薯间作体系水分养分利用

养分随水分迁移而被吸收，水分竞争必然导致养分吸收不均衡。前人做过大量关于水-氮耦合研究，间作体系中有关水分竞争与养分吸收关系报道较少。试验中全生育期单作玉米、间作马铃薯作物氮吸收量与表观耗水量呈显著正相关关系，相关系数分别为0.619和0.701，间作玉米表观耗水量与氮吸收量呈极显著正相关，相关系数为0.769。说明作物表观耗水量与氮吸收量均存在协同吸收效应。全生育期间作玉米表观耗水量与氮吸收量相关系数均高于马铃薯，说明玉米对水分养分的竞争能力较马铃薯更具优势，这与作物种间竞争能力（ARF>0.064）所得结论一致。这可能与两种作物生长规律有关，幼苗期至块茎形成期，马铃薯发芽快，生长期短，植株氮吸收量随水分吸收变化而变化，玉米处于苗期，对水分养分需求量少，因而，此时马铃薯存在明显的竞争优势^[24-26]。马铃薯块茎形成期至淀粉积累期，地上部逐渐枯萎，蒸腾

蒸发逐渐减弱, 养分随水分吸收逐渐减弱, 此时, 玉米处于拔节抽穗期, 水分养分需求量增大, 因此, 这一时期间作玉米明显处于对水分养分竞争优势^[27-28]。马铃薯处于淀粉积累期以后, 水分吸收量急剧减少, 氮吸收量随之减少, 玉米对水分养分吸收持续增加, 直至成熟期。但全生育期单作马铃薯水-氮协同吸收特征不明显, 这可能是由于马铃薯生长前期天气干旱, 作物的蒸腾蒸发量大, 对水分吸收虽较多, 但用于作物生长数量较少, 而此时作物对养分需求量较少, 因此氮吸收量较低, 发棵期以后, 空气湿度较前期升高, 作物叶片增多增大, 表观耗水量主要用于促进作物茎叶增长, 但数量逐渐减少, 氮吸收量随块茎形成需要而逐渐增多^[29-30]。试验结果表明间作作物存在水-氮协同吸收效应, 但植株对土壤水分养分的吸收比例, 以及水分养分在植株体内各部分分配比例尚不清楚, 仍需进一步试验研究。

4 结论

玉米、马铃薯间作具有明显的生物学和经济学产量优势 (LER>1), 作物种间竞争力玉米强于马铃薯 (ARF>0)。与单作相比, 间作玉米总表观耗水量减少, 拔节期达到最大值; 间作马铃薯总表观耗水量增加, 幼苗至发棵期达到最大值。与单作相比, 间作玉米氮素累计吸收量减少 52.04%, 间作马铃薯氮素减少 85.16%。两种间作作物中, 间作玉米氮素累计吸收量高于马铃薯 79.74%。作物表观耗水量与氮吸收量存在显著正相关关系, 且协同吸收效应随生育期推移越明显, 玉米抽穗至成熟期, 单作相关系数 0.701, 间作相关系数达 0.814, 马铃薯块茎形成期至淀粉积累期, 单间作相关系数分别达到 0.808 和 0.875。

参考文献:

- [1] Midega C A O, Salifu D, Bruce T J, et al. Cumulative effects and economic benefits of intercropping maize with food legumes on *Striga hermonthica* infestation [J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 144-152.
- [2] Flores-Sanchez D, Pastor A, Lantinga E A, et al. Exploring maize-legume intercropping systems in southwest Mexico [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2013, 37 (7): 739-761.
- [3] 艾鹏睿, 马英杰, 马亮. 干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (13): 4673-4678.
- [4] 王克林, 黄月, 孙学凯, 等. 辽北地区杨树-玉米间作对土壤水分和养分含量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2386-2392.
- [5] 周绍松, 周敏, 李永梅, 等. 大麦/蚕豆间作对土壤含水量的影响研究 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2008, 23 (4): 532-535.
- [6] 张劲松, 宋兆民, 孟平, 等. 银杏-小麦间作系统水热效应的研究 [J]. *林业科学研究*, 2002, 15 (4): 457-462.
- [7] 侯建伟, 段玉, 张君, 等. 内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用 [J]. *土壤*, 2018, 50 (1): 79-85.
- [8] 叶优良. 间作对氮素和水分利用的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.119.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [10] 杜春风. 马铃薯/玉米间作栽培对土壤和作物的影响 [J]. *浙江大学学报*, 2017, (1): 7-9.
- [11] Willey R W. Intercropping—its importance and research needs. Part 2, Agronomy and research approaches [J]. *Field Crop Abstr*, 1979, 32B (2): 73-85.
- [12] Morris R A, Villegas A N, Polthanee A, et al. Water use by monocropped and intercropped cowpea and sorghum grown after rice [J]. *Angronomy Journal*, 1990, 82: 664-668.
- [13] 顾旭东. 马铃薯间作蚕豆对土壤养分和作物生长的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2017. 17-41.
- [14] Fang G, Ittersum M K V, Wang G, et al. Yield and yield components of wheat and maize in wheat-maize intercropping in the Netherlands [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 76: 17-27.
- [15] 赵建华, 孙建好, 陈伟, 等. 不同作物与玉米间作对玉米产量和生物量累积的影响 [J]. *作物杂志*, 2013, (4): 120-125.
- [16] 柳玲玲, 王文华, 杨再刚, 等. 不同生物有机肥对钩藤产量、品质及土壤生物性状的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (3): 116-121.
- [17] 宋燕燕, 赵秀娟, 张淑香, 等. 盆栽条件下不同氮磷钾养分配比的水溶性肥料对油菜产量、品质及养分吸收的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (1): 68-72.
- [18] 林国伟, 李志, 李晨曦, 等. 黄土高原白草塬土壤水分特征及对土地利用变化的响应 [J]. *水土保持通报*, 2017, (2): 33-37.
- [19] 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.
- [20] 高飞, 王若水, 许华森. 晋西黄土区水肥调控对苹果玉米间作系统土壤含水量及分布的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (4): 94-104.
- [21] 霍高鹏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区枣农复合系统土壤水分利用与竞争 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32 (12): 47-58.

- [22] Zhang Y, Liu J, Zhang J, et al. Row ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat [J]. *Plos One*, 2015, 10 (6): e0129245.
- [23] Manevski K. Reduced nitrogen leaching by intercropping maize with red fescue on sandy soils in North Europe: a combined field and modeling study [J]. *Plant & Soil*, 2015, 388 (1): 1-19.
- [24] 柴强, 殷文. 间作系统的水分竞争互补机理 [J]. *生态学杂志*, 2017, (1): 235-241.
- [25] Latati M, Blavet D, Alkama N, et al. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil [J]. *Plant & Soil*, 2014, 385 (1-2): 1-11.
- [26] Hu F, Gan Y, Cui H, et al. Intercropping maize and wheat with conservation agriculture principles improves water harvesting and reduces carbon emissions in dry areas [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 9-17.
- [27] 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.
- [28] 王小林, 徐伟洲, 张雄, 等. 黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对品种间作竞争的响应 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, (3): 377-387.
- [29] Rusinamhodzi L, Corbeels M, Nyamangara J, et al. Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique [J]. *Field Crops Research*, 2012, 136 (5): 12-22.
- [30] 李鹏程, 苏学德, 王晶晶, 等. 腐植酸肥与菌肥配施对果园土壤性质及葡萄产量、品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (1): 121-126.

Characteristics of interactive absorption of soil water and N in maize and potato intercropping system

LIU Ying-chao^{1, 2}, TANG Li², ZHENG Yi^{2*} (1. Department of Science and Technology, Kunming University, Kunming Yunnan 650214; 2. College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201)

Abstract: Soil water and nitrogen interactive absorption plays an important role in maintaining maize and potato yield. Pot experiment with drip irrigation was conducted in this study, dynamic apparent water consumption of maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) in different growth stages under the conditions of intercropping was quantitatively monitored. From the changes of apparent water consumption and nitrogen content in crops through the growth stages, the relationship between water uptake and nitrogen accumulation in plants were analyzed. Results showed that, maize intercropping potato had obvious yield advantage, the land equivalent ratio (LER) was 1.36, interspecific competition of maize was stronger than potato. In the whole growth period, compared with that of monocropping, intercropping maize apparent water consumption was 16.67% lower, total nitrogen uptake was 96.30% lower, intercropping potato apparent consumption was 15.44% higher, and total nitrogen uptake was 83.66% lower. There was a significant positive correlation of maize between the apparent water consumption and nitrogen accumulation in the whole growth period, the correlation coefficient of intercropping (0.769) was higher than that of monoculture (0.701), and increased with the growth period, the correlation coefficient of maize reached the maximum at heading stage to maturity stage (intercropping maize was 0.814, monocropping maize was 0.717); the apparent water consumption was significantly correlated with the amount of nitrogen accumulation of potato during the formation stage until the starch accumulation stage, and the correlation coefficient of intercropping (0.875) was higher than that of monoculture (0.808). In short, water consumption and nitrogen absorption coefficient of maize and potato intercropping system was higher than monoculture, and the characteristic was more obvious with the growth of crop. In conclusion, maize and potato intercropping promoted the synergistic absorption of water and nitrogen, which was more obvious with the growth period.

Key words: maize; potato; intercropping; water consumption; nitrogen absorption