

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2021)06-0520-09

栽培生理

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2021.06.006

玉米与马铃薯间作对马铃薯干物质积累与养分吸收、分配的影响

肖力力^{1,2}, 田山君^{1,2}, 田双燕^{1,2}, 罗蓉^{1,3}, 李永鹏^{1,2}, 曹国璠^{1,2*}

(1. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 教育部山地植物资源保护与种质创新重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州省药用植物繁育与种植重点(工程)实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 马铃薯与玉米间作是中国西南地区马铃薯生产重要的种植模式, 具有促进资源利用和提高产量优势, 但对于间作模式下马铃薯养分吸收积累的特性并不清楚。采用田间试验的方法, 设马铃薯单作(CK)和马铃薯玉米2:2间作(T)两种种植模式, 研究间作对马铃薯干物质积累量、大量元素积累、中量元素、微量元素积累的影响。结果表明, 间作提高了马铃薯全生育期地上部、块茎的干物质积累量, 利于干物质向块茎分配; 间作增加马铃薯植株、地上部和块茎对氮素的吸收, 显著增加马铃薯块茎中钾、钙、镁的积累, 增加大量和中量养分在马铃薯生育后期向块茎的分配比例; 间作有利于马铃薯对铁、铜、锰和锌的积累与向块茎的分配。因此马铃薯玉米2:2行比间作条件下, 不仅促进马铃薯干物质积累, 而且增加马铃薯对大量养分、中量养分和微量养分的吸收, 有利于马铃薯生产和提高资源利用效率。

关键词: 马铃薯; 间作; 干物质; 大量养分; 微量养分

Effects of Maize and Potato Intercropping on Dry Matter Accumulation, Nutrient Absorption and Distribution of Potato

XIAO Lili^{1,2}, TIAN Shanjun^{1,2}, TIAN Shuangyan^{1,2}, LUO Rong^{1,3}, LI Yongpeng^{1,2}, CAO Guofan^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Key Laboratory of Plant Resource

Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Guiyang, Guizhou 550025, China;

3. Key Laboratory of Medicinal Plant Breeding and Planting in Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Intercropping of potato and maize, as an important planting mode for potato production in southwest China, has the advantages of promoting resource utilization and increasing yield, but the characteristics of nutrient absorption and accumulation of potato under intercropping mode are not clear yet. A plot experiment, including potato monoculture and two rows of potato intercropping with two rows of maize, were conducted to study the effects of intercropping on dry matter accumulation, macronutrient accumulation, medium nutrient accumulation and micronutrient accumulation. Intercropping increased the dry matter accumulation in shoot and tuber during the whole growth period of potato, which was conducive to the distribution of dry matter to tuber. Intercropping increased the absorption of nitrogen

收稿日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960393); 贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009); 贵州省作物学重点学科(黔学位合字ZDXK[2014]8号); 贵州大学引进人才科研基金(贵大人基合字201506)。

作者简介: 肖力力(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为作物栽培与耕作。

*通信作者(Corresponding author): 曹国璠, 博士, 教授, 从事作物栽培学和生态农业教学与科研等工作, E-mail: cgf8933@126.com。

by potato plants, shoots and tubers, significantly increased the accumulation of potassium, calcium and magnesium in potato tubers, and increased the distribution proportion of macronutrient and medium nutrients to tubers in the later stage of potato growth. Intercropping was beneficial to the accumulation and distribution of iron, copper, manganese and zinc to tubers. Therefore, potato and maize with 2:2 row ratio intercropping could not only promote the accumulation of dry matter, but also increase the absorption of macronutrient, medium nutrient and micronutrient, which is conducive to potato production and improve resource utilization efficiency.

Key Words: potato; intercropping; dry matter; macronutrient; micronutrient

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是中国第四大主要粮食作物,具有营养价值高、粮菜饲兼用的特点,其生产对保障国家粮食安全有着重要的意义^[1]。西南地区是马铃薯的主产区之一,马铃薯玉米间作是其一种主要的种植方式。据估计,在西南地区马铃薯与玉米间套作的种植面积超过100万hm²,其产量高低极大地影响粮食安全^[2]。马铃薯与玉米间作属于经典的高秆作物与矮秆作物搭配栽培模式,具有优化田间小气候,促进资源利用效率,减少作物病虫害发生,而广泛分布于世界各地^[3,4]。周锋等^[5]研究表明,与单作相比,间作马铃薯具有更凉爽的微环境,从而促进马铃薯干物质向块茎分配。字淑慧等^[6]认为,马铃薯玉米间作可以提高土地当量比,增加土地资源利用效率。此外,玉米和马铃薯的间作组合可以有效生物控制马铃薯的病虫害,如马铃薯块茎蛾^[7]。

间作是中国传统的种植方式,并被作为解决粮食安全、实现作物产品多样化、推动农业可持续发展的重要手段而大面积推广应用^[8]。间作资源高效利用的前提是科学调控种间竞争,充分挖掘种间互补^[9]。养分就是地下部竞争、互补作用的主要调控因子之一^[10]。研究表明,合理间作可以提高作物养分利用效率,显著改善作物的矿质营养,保障作物在较低肥料投入水平下能够达到较高的产量,从而减少投入^[11,12]。在马铃薯与玉米间作中,地下互作比地上部互作更重要,而且在地下互作中马铃薯占主要优势^[13]。目前,关于间套作对马铃薯生长及产量影响的研究较多,但针对间作对马铃薯生长过程中大量和微量养分积累及转运的研究却鲜有报道。因成本,以最有利于西南地区马铃薯玉米间作的2:2行比为研究处理^[9],设置马铃薯单作为对照,采用田间试验,

分析比较单作和间作模式下马铃薯生长动态、养分积累动态与分配特征,为马铃薯合理间作栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在贵州大学教学实验场(E 106°68', N 26°40', 海拔1 100 m)开展,属亚热带湿润温和型气候,年均气温14.9℃,年均降水量1 178.3 mm,年均日照时数1 148.3 h,全年无霜期246 d。土壤为黄壤,pH 6.25,有机质含量2.69 g/kg,碱解氮(N)87 mg/kg,速效磷(P₂O₅)11.1 mg/kg,速效钾(K₂O)60.1 mg/kg。

1.2 试验材料

马铃薯品种:‘兴佳2号’,玉米品种:‘黔玉5号’。

1.3 试验设计

试验为单因素随机区组试验,设置马铃薯净作(CK)和马铃薯/玉米间作(T)2个处理,3次重复,共6个小区,小区面积72 m²(9 m×8 m)。马铃薯栽培密度67 500株/hm²,行距40 cm、株距37 cm;玉米栽培密度45 000株/hm²,行距55 cm、株距40 cm。2019年4月18日播种,马铃薯与玉米间作栽培行比为2:2,南北行向种植。试验不施化肥,于播种前一周人工撒施有机肥作底肥,有机肥(N+P₂O₅+K₂O≥5%,有机质≥45%)施用量7 500 kg/hm²,均匀撒施后深翻入土。其余田间管理与当地高产栽培保持一致。马铃薯和玉米的收获日期分别为8月3日和9月2日。

1.4 测定项目及方法

在马铃薯块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期3个时期取样。每小区随机选取5株马铃薯

植株, 分为茎、叶、根和块茎4个部分, 于105℃杀青30 min后80℃烘干至恒重。称取干重后, 粉碎样品过100目筛, 用于矿质元素测定。

氮磷钾含量的测定: 准确称取各部位样品0.5 g经H₂O₂-浓H₂SO₄消煮^[14], 用凯氏定氮法测定氮含量^[14], 钼锑抗比色法测定磷含量^[14], 火焰光度计法测定钾含量^[14]。

钙、镁、铁、铜、锌、锰和硼的测定: 准确称量0.5 g样品粉末置于瓷坩埚中, 然后在马弗炉中进行灰化, 再用1:1硝酸溶液溶解, 过滤, 超纯水定容至25 mL, 采用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)分别测定铁、锰、铜、锌、硼、钙、镁含量^[15]。

养分积累量 = 干物质量 × 养分含量

养分分配率 = 各部位养分积累量/植株养分总积累量

1.5 数据处理与统计分析

采用Microsoft Excel 2016对试验数据进行统计与图表制作, SPSS 23.0对数据进行独立样本T检验。

2 结果与分析

2.1 间作对马铃薯干物质积累与分配的影响

随生育进程推进, 两种栽培模式的马铃薯地上部干重均呈先增后降的趋势, 而分配比例则呈降低趋势; 薯块干物质重及其分配比例呈持续升高趋势(表1)。说明随着生长生育期的延长, 马铃薯植株生长中心从地上部转移至地下部。

表1 间作对马铃薯不同生育时期各器官干物质积累的影响

Table 1 Effects of intercropping on dry matter accumulation in different organs of potato at different growth stages

生育时期 Growth stage	栽培模式 Planting mode	地上部 Shoot		薯块 Tuber		整株 Whole plant
		积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)
块茎形成期 Tuber formation	CK	1 628.40 ± 70.15 b	68.51 ± 2.64 a	400.20 ± 62.24 b	18.67 ± 2.75 a	2 139.70 ± 75.45 b
	T	2 024.03 ± 41.96 a	76.16 ± 2.86 a	812.35 ± 86.68 a	27.37 ± 2.46 a	2 958.53 ± 52.59 a
块茎增长期 Tuber bulking	CK	2 147.18 ± 75.80 b	42.33 ± 5.36 a	3 916.58 ± 396.92 a	63.28 ± 2.57 a	6 159.38 ± 408.27 a
	T	2 576.59 ± 78.25 a	35.14 ± 2.40 a	3 612.64 ± 765.42 a	56.18 ± 5.46 a	6 281.18 ± 770.44 a
淀粉积累期 Starch accumulation	CK	2 046.08 ± 155.51 a	23.67 ± 1.69 a	6 169.05 ± 342.71 a	74.29 ± 2.14 a	8 297.31 ± 321.17 a
	T	2 108.85 ± 234.90 a	24.72 ± 2.10 a	6 688.95 ± 318.69 a	75.47 ± 1.66 a	8 875.11 ± 507.03 a

注: 平均值后误差为标准误。同列同一生育时期不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: The error after the mean value is standard error. Different small letters in the same column within the same growth stage mean significant difference at 0.05 level between treatments. The same below.

间作马铃薯地上部干重在块茎形成期和块茎增长期均显著高于CK, 在淀粉积累期则无显著差异。间作马铃薯块茎干重在块茎形成期和淀粉积累期均高于同期CK, 在块茎形成期差异达到显著水平, 且其干物质分配比例在这两个时期均比同期单作高。由此说明间作有利于马铃薯生育前期和中期干物质的积累, 使得马铃薯植株具备

较强的同化和运输能力, 为中期和后期马铃薯块茎干物质的积累创造条件, 有利于干物质向马铃薯“库”的分配。

2.2 间作对马铃薯养分积累与分配的影响

2.2.1 间作对马铃薯氮磷钾积累量与分配的影响

在马铃薯生长期, 各处理马铃薯地上部氮积累量总体呈下降的变化趋势, 块茎的氮积累量

和植株总积累量则呈升高趋势,这是由于氮分配随马铃薯生长中心转移而出现的变化。间作处理马铃薯地上部的氮积累量分别比同期单作高34.27%、47.10%和30.28%,与CK之间的差异均达到显著水平;间作处理马铃薯块茎氮积累量在马铃薯生长期均处于较高水平,尤其是在块茎形成期和淀粉积累期,显著高于单作;间作马铃薯植株氮总积累量显著高于同期的单作处理。结果表明,间作处理促进马铃薯全育期内地上部对氮的吸收,促进块茎在形成前期和膨大后期对氮的吸收。各处理地上部的磷和钾积累量呈现先上升后下降的变化趋势;块茎和整株的磷钾总积累量均表现持续升高的趋势。各试验处理中,间作马铃薯在全生育期内块茎和地上部的磷积累量均较高,但是与CK相比差异并不显著。在块茎形

成期,间作处理的地上部、块茎和整株钾积累量分别比单作高31.17%、92.45%和32.16%,与CK差异均达到显著水平;在淀粉积累期,间作处理的块茎和马铃薯植株钾的总积累量均显著高于单作,比单作高57.80%和37.83%。说明,间作处理有利于马铃薯生育前期地上部和块茎对钾积累,促进块茎在生育后期对钾的吸收。

随着生育进程的推进,马铃薯地上部中氮磷钾的分配比例逐渐下降,块茎中的分配比例逐渐上升,这可能是因为随着块茎生长,氮磷钾从地上部转移到块茎中的结果。总体而言,间作明显促进氮磷钾向块茎中分配,间作马铃薯块茎除了在块茎增长期氮磷钾元素的分配比例略低于单作外,在其余时期间作马铃薯的氮磷钾在块茎中分配比例均大于单作(表2)。

表2 间作对马铃薯不同生育时期N、P、K积累的影响

Table 2 Effects of intercropping on N, P and K accumulation of potato at different growth stages

大量元素 Macronutrient	生育时期 Growth stage	栽培模式 Planting mode	地上部 Shoot		薯块 Tuber		整株 Whole plant
			积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)
N	块茎形成期	CK	49.29 ± 3.62 b	85.66 ± 2.18 a	6.41 ± 1.09 b	11.24 ± 2.32 a	57.49 ± 3.65 b
		T	66.18 ± 3.37 a	80.74 ± 2.42 a	13.60 ± 1.65 a	16.59 ± 2.57 a	81.97 ± 4.44 a
	块茎增长期	CK	39.95 ± 1.05 b	59.92 ± 1.22 a	25.53 ± 1.82 a	38.15 ± 1.05 a	66.76 ± 2.84 b
		T	58.77 ± 0.51 a	64.61 ± 5.02 a	31.05 ± 7.25 a	34.13 ± 5.32 a	90.95 ± 5.57 a
	淀粉积累期	CK	37.78 ± 2.04 b	40.14 ± 2.34 a	55.37 ± 2.99 b	58.77 ± 2.09 a	94.17 ± 3.49 b
		T	49.22 ± 0.67 a	35.92 ± 0.98 a	86.97 ± 4.13 a	63.30 ± 1.03 a	137.26 ± 4.27 a
P	块茎形成期	CK	6.87 ± 0.31 a	78.84 ± 1.92 a	1.44 ± 0.21 a	16.57 ± 2.13 a	8.72 ± 0.29 a
		T	6.79 ± 0.28 a	68.03 ± 4.43 a	2.81 ± 0.57 a	28.15 ± 4.15 a	9.98 ± 0.65 a
	块茎增长期	CK	7.69 ± 0.11 a	40.51 ± 4.13 a	11.52 ± 2.29 a	58.03 ± 4.36 a	19.49 ± 2.41 a
		T	8.43 ± 0.52 a	42.74 ± 5.05 a	10.92 ± 1.29 a	55.37 ± 5.23 a	19.72 ± 0.81 a
	淀粉积累期	CK	4.85 ± 0.36 a	23.05 ± 2.24 a	15.85 ± 0.90 a	75.33 ± 2.43 a	21.04 ± 0.76 a
		T	5.39 ± 0.75 a	22.11 ± 1.37 a	18.52 ± 1.46 a	76.86 ± 1.31 a	24.15 ± 2.15 a
K	块茎形成期	CK	49.14 ± 4.16 b	85.19 ± 1.97 a	7.42 ± 1.04 b	11.30 ± 2.35 a	60.56 ± 3.56 b
		T	64.46 ± 3.09 a	81.50 ± 2.13 a	14.28 ± 1.40 a	16.30 ± 1.98 a	80.04 ± 1.69 a
	块茎增长期	CK	56.66 ± 8.06 a	62.91 ± 0.99 a	43.09 ± 5.78 a	36.81 ± 1.05 a	101.69 ± 9.71 a
		T	72.02 ± 3.88 a	70.27 ± 7.93 a	34.88 ± 6.12 a	29.09 ± 8.07 b	109.12 ± 2.38 a
	淀粉积累期	CK	50.75 ± 3.26 a	47.97 ± 2.32 a	66.14 ± 4.35 b	51.01 ± 2.14 a	118.72 ± 4.30 b
		T	55.88 ± 5.82 a	40.55 ± 1.07 b	104.37 ± 5.64 a	58.88 ± 1.43 a	163.64 ± 8.45 a

2.2.2 间作对马铃薯钙镁积累与分配的影响

与氮磷钾变化不同, 马铃薯植株、地上部和块茎的钙镁积累量均随着生育期的推进呈逐渐升高趋势。间作马铃薯植株钙总积累量在块茎形成期和块茎增长期分别高于CK 33.51%和26.35%, 差异均达到显著水平; 间作处理的地上部钙积累量在马铃薯全生育期内均明显高于单作, 尤其是在块茎形成期, 差异达到显著水平; 间作马铃薯块茎的钙积累量在淀粉积累期显著高于单作, 增长66.67%。说明, 间作增加马铃薯生长前期地上

部钙积累量, 随着马铃薯的生长, 地上部中的钙运输到块茎中, 间作处理与单作马铃薯地上部中钙积累量差异降低。在块茎形成期和块茎增长期, 间作处理的马铃薯整株的镁总积累量分别高于CK 36.94%和17.48%, 差异均达到显著水平; 间作马铃薯地上部镁积累在块茎形成期和块茎增长期均显著高于CK; 间作马铃薯块茎在块茎形成期和淀粉积累期镁积累量分别高于单作92.00%和51.08%, 差异均达到显著水平(表3)。说明, 该间作模式能够不同程度升高马铃薯地上部和块茎中镁积累量。

表3 间作对马铃薯不同生育时期Ca、Mg积累的影响

Table 3 Effects of intercropping on Ca and Mg accumulation of potato at different growth stages

中量元素 Middle-nutrient	生育时期 Growth stage	栽培模式 Planting mode	地上部 Shoot		薯块 Tuber		整株 Whole plant
			积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)	比例(%) Rate	积累量(kg/hm ²) Accumulation (kg/ha)
Ca	块茎形成期	CK	25.50 ± 0.73 b	95.17 ± 0.08 a	0.41 ± 0.05 a	1.54 ± 0.15 a	26.79 ± 0.79 b
		T	34.14 ± 1.86 a	95.43 ± 0.67 a	0.72 ± 0.17 a	2.05 ± 0.67 a	35.77 ± 1.86 a
	块茎增长期	CK	38.83 ± 5.57 a	91.98 ± 1.04 a	2.67 ± 0.37 a	6.34 ± 0.94 a	42.20 ± 1.43 b
		T	46.57 ± 9.40 a	92.51 ± 0.90 a	4.96 ± 0.37 a	5.92 ± 0.90 a	53.32 ± 1.01 a
	淀粉积累期	CK	43.61 ± 1.27 a	90.73 ± 0.14 a	3.87 ± 0.12 b	8.05 ± 0.14 b	48.07 ± 3.46 a
		T	48.88 ± 4.33 a	87.25 ± 1.06 b	6.45 ± 0.45 a	11.68 ± 1.06 a	57.93 ± 6.33 a
Mg	块茎形成期	CK	12.61 ± 0.88 b	94.36 ± 0.10 a	0.50 ± 0.06 b	3.73 ± 0.19 a	13.37 ± 0.94 b
		T	17.08 ± 0.53 a	93.29 ± 0.87 a	0.96 ± 0.14 a	5.26 ± 0.80 a	18.31 ± 0.45 a
	块茎增长期	CK	17.04 ± 0.61 b	82.56 ± 3.69 a	3.58 ± 0.83 a	16.67 ± 3.67 a	21.39 ± 0.23 b
		T	21.86 ± 0.44 a	86.98 ± 0.84 a	3.08 ± 0.19 a	12.27 ± 0.84 a	25.13 ± 0.30 a
	淀粉积累期	CK	19.81 ± 2.18 a	62.81 ± 5.21 a	8.81 ± 0.43 b	28.98 ± 2.66 a	30.65 ± 1.41 a
		T	24.73 ± 2.65 a	65.92 ± 9.82 a	13.31 ± 0.43 a	35.06 ± 1.86 a	38.27 ± 3.06 a

与氮磷钾不同, 在马铃薯全生育期内, 钙镁主要分配在马铃薯的地上部中, 在块茎中分配很少。这是因为钙是通过木质部和水一起运输, 其运输速率受蒸腾作用的影响, 所以导致地上部的钙不易向块茎输出; 而镁是因为植株中镁离子不易从地上部中输出进入韧皮部的缘故。

2.2.3 间作对马铃薯微量元素积累的影响

马铃薯植株和地上部的锌、硼的积累量均随生育进程推进而呈升高趋势; 铁、铜、锰积累量

均随生育期延长呈先升高后降低的趋势, 在块茎增长期达到最大。这可能是因为到马铃薯生育后期, 地上部叶片等脱落导致养分随叶片脱落进入土壤和地上部养分转运到块茎的结果。

除铜以外, 其余4种微量元素在任何时期均主要分配在地上部, 间作明显增加各微量元素在块茎中的分配比例, 显著影响马铃薯对铁、铜、锌、硼的积累。在块茎增长期, 间作马铃薯植株的铁和地上部铁积累量显著高于单作, 分别增加

16.52% 和 30.05%。间作对铜的影响主要体现在间作影响马铃薯地上部、块茎中铜的积累和分配;在块茎形成期,间作马铃薯块茎的铜积累量和分配比例显著高于单作,分别增加 92.14% 和 67.54%;在块茎增长期,间作马铃薯植株和地上部铜积累量比单作高 15.35% 和 38.84%,与 CK 的差异均达到显著水平;在淀粉积累期,间作马铃薯块茎铜积累量比单作高 27.46%,与单作差异达到显著水平。间作马铃薯地上部和块茎锌积累量在马铃薯全生育期均高于单作;在块茎形成期,间作马铃薯植株锌总积累量和地上部锌积累量分别比 CK 增加 42.44% 和 40.47%,差异均达到显著水平;在块茎增长期,间作马铃薯植株锌总积累量和地上部锌积累量分别显著高于单作 34.82%、38.98%。间作提高马铃薯块茎形成期和淀粉积累期马铃薯地上部和块茎的硼积累量,块茎和地上部在块茎形成期的硼积累量分别比 CK 高 92.80% 和 38.03%(表 4)。

3 讨 论

马铃薯产量的形成是光合产物积累和分配的结果,因此在增加干物质积累的同时,必须保证同化产物在“源”和“库”的合理分配^[16,17]。马铃薯的干物质积累过程因品种、施肥和养分管理等栽培条件不同而有很大差异。本研究表明,马铃薯在块茎形成期之前是以茎叶地上部生长为主;块茎形成期后,以块茎生长为主,这与柳燕兰等^[18]研究相似。

间作显著增加马铃薯干物质积累,主要表现为间作显著增加块茎形成期和块茎增长期马铃薯地上部的干物质积累量,显著增加块茎形成期和淀粉积累期块茎的干物质积累量,这是因为与单作相比,间作马铃薯前期积累在茎叶的光合产物较多,为生育后期大量干物质转移到块茎提供基础^[19];从块茎增长期到淀粉积累期,间作玉米对马铃薯遮阴,形成的阴凉环境,有利于马铃薯地上部的的光合产物向块茎的转移^[5]。金建新等^[20]研究表明间作模式使得马铃薯对水分利用效率增加,促进马铃薯地上部光合作用,从而促进其干物质积累。

氮、磷、钾是作物生长发育所需的三大营养元素,是作物产量形成的基础,合理间作能提高作物氮磷钾积累量及其分配系数^[21]。本研究结果显示,两种种植方式的马铃薯植株、地上部和块茎的氮磷钾积累量变化趋势相似;间作明显增加氮、钾的积累量及氮磷钾向块茎分配的比例。氮可促进植株生长和光合作用,较高的氮能延缓叶片衰老延长叶片功能期^[21];钾能增强马铃薯光合作用和相关酶活性,加速同化物向块茎的运输,增加块茎重、单株结薯数和商品薯率^[22,23]。因此,间作提高块茎形成期马铃薯地上部对氮素和钾素吸收,有利于马铃薯早期地上部光合器官的建成,为马铃薯块茎增长和发育提供坚实基础;在马铃薯生育中后期茎叶钾和氮的积累有利于延缓间作马铃薯地上部的衰老,使叶片保持较高的光合作用,促进块茎的干物质积累。

钙是植株生长必需的营养元素,其是植物细胞壁、细胞膜和多种酶的组成成分,具有促进光合产物运输、延缓植株衰老等作用^[24-26]。镁是植物叶绿素的重要组分,参与光合作用、呼吸作用等过程,对植物的碳水化合物合成运输、氨基酸代谢等有重要影响^[27,28]。本研究表明,在任何生育时期,钙和镁元素均主要分配在马铃薯的地上部位,这与党宏波^[29]研究结果相似。间作显著增加块茎形成期和块茎增长期马铃薯对钙、镁的积累,促进叶片的光合作用和同化物向库器官的运输。

铁、锌、锰、铜等微量元素是植物生长所必需的营养元素,他们直接参与光合、呼吸等重要代谢过程,极大地影响作物生长发育、产量和品质形成^[30]。块茎增长期是马铃薯吸收铁的关键时期^[31],地上部较高的铁积累量有利于叶片保持较高的光合作用,间作显著增加马铃薯地上部在块茎增长期对铁的积累,在一定程度上有利于增加地上部光合作用。间作显著增加块茎形成期和淀粉积累期马铃薯块茎的硼积累量,Almeida 等^[32]认为,在块茎形成之初,块茎中的硼快速积累是由于硼参与了分生组织的生长和细胞分裂、细胞壁的形成以及淀粉从地上部向块茎的转移,因此,间作增加块茎形成期马铃薯块茎的积累量,对马铃薯块茎分化与形成具有促进作用,也促进

表4 间作对马铃薯不同生育时期微量元素积累的影响

Table 4 Effects of intercropping on micronutrient accumulation of potato at different growth stages

微量元素 Micronutrient	生育时期 Growth stage	栽培模式 Planting mode	地上部 Shoot		薯块 Tuber		整株 Whole plant
			积累量(g/hm ²) Accumulation (g/ha)	比例(%) Rate	积累量(g/hm ²) Accumulation (g/ha)	比例(%) Rate	积累量(g/hm ²) Accumulation (g/ha)
Fe	块茎形成期	CK	543.45 ± 28.18 a	79.16 ± 1.44 a	57.20 ± 13.12 a	8.48 ± 2.02 a	685.73 ± 23.36 a
		T	641.64 ± 61.45 a	78.72 ± 0.38 a	78.96 ± 7.82 a	9.69 ± 0.40 a	815.32 ± 79.46 a
	块茎增长期	CK	1 233.75 ± 46.23 b	64.84 ± 2.69 a	623.06 ± 37.88 a	2.54 ± 2.27 a	1 903.06 ± 44.07 b
		T	1 604.51 ± 86.73 a	72.45 ± 4.56 a	590.09 ± 41.14 a	26.51 ± 4.27 a	2 217.42 ± 56.70 a
	淀粉积累期	CK	991.94 ± 86.10 a	55.68 ± 2.07 a	725.13 ± 32.33 a	40.65 ± 2.06 a	1 782.61 ± 66.44 a
		T	1 058.40 ± 152.38 a	53.31 ± 1.78 a	894.15 ± 42.41 a	44.51 ± 1.91 a	1 986.99 ± 102.94 a
Cu	块茎形成期	CK	30.12 ± 2.05 a	85.59 ± 1.92 a	3.69 ± 0.59 b	10.69 ± 2.09 b	35.12 ± 1.64 a
		T	30.77 ± 1.30 a	78.67 ± 1.49 b	7.09 ± 0.98 a	17.91 ± 1.44 a	39.19 ± 2.32 a
	块茎增长期	CK	36.22 ± 0.84 b	53.09 ± 0.28 b	30.99 ± 0.55 a	45.43 ± 0.14 a	68.22 ± 1.27 b
		T	50.29 ± 3.43 a	63.80 ± 3.26 a	27.27 ± 2.06 a	34.75 ± 3.13 b	78.69 ± 1.69 a
	淀粉积累期	CK	24.14 ± 1.27 a	38.72 ± 1.47 a	37.00 ± 1.16 b	59.41 ± 1.65 a	62.31 ± 1.64 b
		T	27.27 ± 1.15 a	36.16 ± 0.68 a	47.16 ± 1.89 a	62.58 ± 0.99 a	75.37 ± 2.70 a
Zn	块茎形成期	CK	70.85 ± 5.92 b	86.73 ± 0.61 a	9.75 ± 2.92 a	11.93 ± 0.65 a	81.69 ± 6.89 b
		T	99.52 ± 5.82 a	85.48 ± 2.60 a	14.28 ± 4.87 a	12.33 ± 2.56 a	116.36 ± 5.33 a
	块茎增长期	CK	128.98 ± 3.90 b	59.74 ± 1.74 a	50.27 ± 3.45 a	38.11 ± 1.66 a	179.77 ± 5.76 b
		T	179.26 ± 13.69 a	74.05 ± 2.78 a	60.17 ± 10.22 a	24.72 ± 2.95 a	242.37 ± 24.65 a
	淀粉积累期	CK	283.70 ± 11.71 a	85.37 ± 3.10 a	58.75 ± 8.29 a	17.20 ± 2.52 a	342.01 ± 4.59 a
		T	294.78 ± 14.23 a	88.10 ± 2.59 a	65.54 ± 8.13 a	18.14 ± 2.45 a	362.36 ± 9.65 a
Mn	块茎形成期	CK	127.33 ± 7.65 a	96.47 ± 0.61 a	2.61 ± 0.37 a	2.02 ± 0.40 a	131.90 ± 7.14 a
		T	164.76 ± 19.79 a	95.48 ± 0.34 a	5.22 ± 4.42 a	2.92 ± 0.55 a	172.66 ± 21.16 a
	块茎增长期	CK	267.30 ± 7.59 a	93.19 ± 0.92 a	15.28 ± 0.77 a	6.08 ± 0.86 a	286.62 ± 17.36 a
		T	272.76 ± 12.42 a	94.98 ± 2.10 a	12.73 ± 1.02 a	4.45 ± 1.94 a	287.11 ± 12.51 a
	淀粉积累期	CK	151.89 ± 4.31 a	83.25 ± 2.07 a	30.23 ± 3.93 a	16.57 ± 2.15 a	182.43 ± 2.52 a
		T	148.14 ± 13.43 a	82.32 ± 1.54 a	29.44 ± 2.82 a	16.52 ± 1.62 a	179.65 ± 14.16 a
B	块茎形成期	CK	51.99 ± 3.17 b	83.82 ± 1.79 a	7.09 ± 1.14 b	11.44 ± 1.65 a	62.03 ± 3.55 b
		T	71.76 ± 2.00 a	81.39 ± 1.98 a	13.67 ± 1.41 a	15.52 ± 1.65 a	88.16 ± 0.32 a
	块茎增长期	CK	78.68 ± 3.90 a	59.74 ± 1.74 a	50.27 ± 3.45 a	38.11 ± 1.66 a	131.77 ± 5.76 a
		T	88.15 ± 4.15 a	64.66 ± 4.24 a	66.05 ± 8.11 a	33.13 ± 4.25 a	137.21 ± 8.73 a
	淀粉积累期	CK	110.68 ± 8.04 a	56.90 ± 2.30 a	81.65 ± 2.40 b	42.21 ± 2.22 a	194.06 ± 7.06 a
		T	133.77 ± 7.31 a	56.21 ± 1.85 a	102.20 ± 1.01 a	42.94 ± 2.01 a	237.97 ± 13.28 a

淀粉积累期淀粉向块茎的转移。

间作提高马铃薯养分的积累原因可以解释为: 首先是间作促进物种之间的互补效应^[33]。在间作系统中, 由于不同作物间养分需求种类、根系形态和需求高峰时间不同, 间作可减少作物之间对养分的竞争, 从而促进种间互补效应。李旺等^[34]研究表明玉米马铃薯间作有利于群体对养分的吸收与利用。蔡明等^[35]研究表明马铃薯、燕麦间作可以提高马铃薯氮素、钾素含量, 但降低了磷素含量。其次间作能促进玉米根系酸性磷酸酶和有机酸的分泌, 增加土壤中P、Fe、Mn、Cu、Zn等的有效性, 从而能促进间作作物对土壤微量元素的吸收^[36]。Taskin等^[37]发现, 由于禾本科植物在生长过程中会释放植物铁载体, 使得与玉米间作的木豆、花生和豇豆对镁、铁和锌的吸收增加。Stoltz等^[38]研究表明玉米和蚕豆间作促进蚕豆对Ca、Mg吸收提高了土壤养分利用效率。最后是间作马铃薯相对于单作马铃薯具有较大的根系空间分布面积和较长的根系寿命, 增加了作物根系对养分吸收面积和吸收时间, 因此能够促进间作马铃薯获取充足的微量元素和氮磷钾等养分^[4]。

本研究结果表明, 与马铃薯单作相比, 马铃薯与玉米2:2行比间作显著增加了马铃薯地上部和块茎的干物质积累量, 促进马铃薯同化物向块茎分配, 从而提高干物质的利用效率。与单作相比, 马铃薯玉米间作主要增加马铃薯块茎形成期和块茎增长期地上部的微量元素和大量元素的积累量, 对于块茎而言, 间作主要增加马铃薯块茎形成期和淀粉积累期的矿质元素积累量, 从而增加马铃薯对矿质元素的积累。总体而言, 间作促进马铃薯对干物质的积累和向马铃薯块茎的分布, 促进马铃薯对养分的吸收积累。

[参 考 文 献]

- [1] 陈萌山, 王小虎. 中国马铃薯主食产业化发展与展望[J]. 农业经济问题, 2015, 36(12): 4-11.
- [2] 方玉川, 张万萍, 白小东. 马铃薯间、套、轮作[M]. 北京: 气象出版社, 2019.
- [3] 赵胜利. 施氮对玉米//马铃薯作物养分吸收和土壤硝态氮含量的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2015.
- [4] 安瞳昕, 杨圆满, 周锋, 等. 间作对玉米马铃薯根系生长与分布的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2018, 33(2): 363-370.
- [5] 周锋, 安瞳昕, 吴开贤, 等. 间作群体中玉米对马铃薯生长及竞争力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 105-112.
- [6] 字淑慧, 吴开贤, 安瞳昕, 等. 行距对间作玉米/马铃薯产量优势和种间关系的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 34(2): 200-209.
- [7] Zheng Y Q, Zhang L M, Chen B, et al. Potato/Maize intercropping reduces infestation of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) by the enhancement of natural enemies [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(2): 394-405.
- [8] 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.
- [9] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31-34.
- [10] Mushagalusa G N, Ledent J F, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: effects on growth and yield [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(2): 180-188.
- [11] 唐文雪, 杨思存, 马忠明. 沿黄灌区玉米套种针叶豌豆栽培模式研究[J]. 甘肃农业科技, 2009(5): 7-10.
- [12] 付学鹏, 吴凤芝, 吴瑕, 等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 525-535.
- [13] Wu K X, Fullen M A, An T X. 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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 刘帮艳, 李金玲, 曹国璠, 等. 高海拔环境太子参生物量、药用成分及矿质元素的动态变化[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 132-136.
- [16] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 423-430.
- [17] 何万春, 何昌福, 邱慧珍, 等. 不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 175-182.
- [18] 柳燕兰, 郭贤仕, 张绪成, 等. 密度和施肥对旱地马铃薯干物质积累、产量和水肥利用的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 320-

- 331.
- [19] Li L, Sun J, Zhang F. Root distribution and interactions between intercropped species [J]. *Oecologia*, 2006, 147: 280–290.
- [20] 金建新, 何进勤, 冯付军, 等. 马铃薯/玉米间作对作物生理生态特性的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(5): 14–19.
- [21] Koch M, Naumann M, Pawelzik E, *et al.* The importance of nutrient management for potato production part I: plant nutrition and yield [J]. *Potato Research*, 2020, 63(1): 97–119.
- [22] Torabian S, Farhangi-Abriz S, Qin R J, *et al.* Potassium: a vital macronutrient in potato production—a review [J]. *Agronomy*, 2021, 11(3): 543.
- [23] 周芳, 贾景丽, 刘兆财, 等. 钾肥对不同马铃薯品种产量和品质的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2021, 35(4): 349–353.
- [24] 辛建华. 钙素对马铃薯生长发育、光合作用及物质代谢影响的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [25] 麻浩, 王爽, 周亚丽. 植物中钙依赖蛋白激酶的研究进展 [J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(4): 565–572.
- [26] 曾后清, 张夏俊, 张亚仙, 等. 植物类钙调素生理功能的研究进展 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(6): 705–715.
- [27] 刘林敏, 徐火忠, 宁建美, 等. 镁对马铃薯产量和经济性状的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2005, 19(1): 28–29.
- [28] Cakmak I, Yazici A M. Magnesium: a forgotten element in crop production [J]. *Better Crops*, 2010(94): 23–25.
- [29] 党宏波. 钙、镁元素对马铃薯产量和品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [30] 许亚芳, 王云, 任帅帅, 等. 微量元素喷施对冬小麦籽粒产量和品质的影响 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37(12): 10–17.
- [31] 魏福龙, 曾路生, 李俊良, 等. 膜下滴灌不同追肥处理对马铃薯商品薯率及微量元素吸收效率的影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(10): 28–34.
- [32] Almeida L, Pereira H S, Cardoso A F, *et al.* Accumulation and export of micronutrients in potato fertilized with organic–mineral fertilizer [J]. *Bioscience Journal*, 2018, 34(6): 71–80.
- [33] 党小燕, 刘建国, 帕尼古丽, 等. 不同棉花间作模式中作物养分吸收和利用对间作优势的贡献 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 513–519.
- [34] 李旺, 周锋, 吴开贤, 等. 土壤异质性施肥对玉米马铃薯间作体系养分吸收与利用特征的影响 [J]. *云南农业大学学报: 自然科学版*, 2020, 35(2): 338–344.
- [35] 蔡明, 刘吉利, 杨亚亚, 等. 马铃薯燕麦间作和施氮对马铃薯干物质累积、产量及品质的影响 [J]. *西北农业学报*, 2020, 29(3): 354–362.
- [36] Li L, Li S M, Sun J H, *et al.* Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192–11196.
- [37] Taskin M B, Kadioglu Y K, Sahin O, *et al.* Effect of acid modified biochar on the growth and essential and non-essential element content of bean, chickpea, soybean, and maize grown in calcareous soil [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(13): 1–10.
- [38] Stoltz E, Wallenhammar A C, Nadeau E. Functional divergence effects of intercropped faba bean and maize in organic production for forage increase mineral contents and reduces leaf spots [J]. *Agricultural and Food Science in Finland*, 2018, 27(2): 110–123.