

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*

李 旺[#], 周 锋[#], 吴开贤, 杨友琼, 吴伯志, 安瞳昕^{**}

(云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】土壤养分异质性能显著影响植物的生长,而异质性施肥是造成土壤养分异质性的主要方式。为研究异质性施肥对单、间作系统养分吸收和利用特征的影响。【方法】对玉米马铃薯间作群体进行不同养分分布施肥,研究不同作物对异质性施肥养分的吸收与利用规律。【结果】不论单作还是间作,土壤养分空间异质性均能增加玉米和马铃薯的养分积累量;在间作群体中,土壤异质性施肥能极显著地降低玉米养分利用率($P<0.01$),而对马铃薯仅磷利用率达到显著降低($P<0.05$),但在单作群体中养分异质性施肥仅对马铃薯磷($P=0.027$)和钾($P=0.013$)的利用率有显著降低的作用;在间作群体种间行内提高施肥量能极显著地提高土地当量比(LER)($P=0.003$)。【结论】土壤养分空间异质性施肥(种间高肥)有利于玉米马铃薯间作群体对养分的吸收与利用,能提高复合产量15%。

关键词: 土壤异质性施肥; 养分积累量; 养分干物质利用率; 间作; 玉米; 马铃薯

中图分类号: S 344.2; S 506.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 02-0338-07

Effects of Soil Heterogeneity Fertilization on the Nutrient Uptake and Utilization Characteristics of Maize and Potato Intercropping System

LI Wang, ZHOU Feng, WU Kaixian, YANG Youqiong, WU Bozhi, AN Tongxin

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] Heterogeneous fertilization is the main way to cause soil nutrient heterogeneity and can significantly affect the growth of plants. In order to study the effect of heterogeneous fertilization on the nutrient uptake and utilization in the intercropping system and monoculture system. [Methods] Different nutrient distribution and fertilization were carried out in maize and potato intercropping population to study the law of absorption and utilization of heterogeneous fertilization nutrients by different crops. [Results] The spatial heterogeneity of soil nutrients could increase the nutrient accumulation of maize and potato both under single cropping and intercropping. In intercropping system, soil nutrient heterogeneity significantly decreased the nutrient use efficiency of

收稿日期: 2018-07-12

修回日期: 2020-03-25

网络首发时间: 2020-05-26 11:22:50

*基金项目: 国家自然科学基金(31660378); 云南省自然科学基金资助项目(2014FB144); 农业部公益性行业专项(201503119-03-03); 云南省农田无公害生产创新团队(2017HC015); 云南省科技计划重点研发项目(2018BB015); 云南省玉米产业技术体系资助项目。

作者简介: [#]对本文贡献等同, 为并列第一作者。李旺(1990—), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 主要从事玉米生产研究。E-mail: liwang710@126.com; 周锋(1985—), 男, 湖北天门人, 博士, 讲师, 主要从事耕作与栽培研究。E-mail: 466591215@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 安瞳昕(1974—), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事山地农业水土保持与可持续发展研究。E-mail: tongxinan2012@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200525.1504.005.html>



maize ($P<0.01$), and the phosphorus use efficiency decreased significantly of potato ($P<0.05$), however, in monoculture system, the effect of nutrient heterogeneity on the potato phosphorus ($P=0.027$) and potassium ($P=0.013$) utilization decreased significantly. In intercropping system, high amount of fertilizer within interspecific rows significantly increased the soil equivalent ratio (LER) ($P=0.003$). [**Conclusion**] Overall, spatial heterogeneous fertilization of soil nutrients (high amount of fertilizer within interspecific rows) was beneficial to nutrient uptake and utilization of intercropped maize and potato population, and increased compound yield by 15%.

Keywords: soil heterogeneity fertilization; nutrient accumulation; nutrient dry matter utilization rate; intercropping; maize; potato

自然条件下,土壤养分的分布通常不均匀,即表现为异质性^[1-2]。在农田生态环境中,因土壤耕作、施肥措施和不均匀的种植格局等多种人为因素的驱动,土壤养分的异质性程度进一步加大,这一现象在农业生产中已引起关注^[3]。土壤养分空间异质性能影响植物个体的形态、生理和生长^[4],进而调节植物间种内和种间的相互作用关系^[5-6],改变植物多样性的功能^[7]。尤其值得关注的是,近年来研究表明:土壤养分异质性促进植物多样性与生产力的正相关性^[8]。

间作是重要的作物多样性种植措施,能够提高作物对土壤养分的利用率^[9-10]。鉴于土壤中普遍存在的养分异质性分布状况,探讨间作对异质性养分的利用及研究间作的养分利用优势有重要意义。目前研究已经明确了在养分异质性条件有利于作物多样性种植的生产力的提高,同时间作也能进一步驱动养分异质性的形成^[3];因此,有必要研究多样性种植对异质性养分吸收和利用的特点。目前研究在多样性作物群体对异质性养分的优势利用特征和机制上还缺乏认识。植物养分利用的增加可通过提高养分吸收量和利用效率来实现,而作物多样性群体是通过哪种途径来提高养分利用有待研究。

玉米马铃薯间作在中国和世界各地广泛种植,具有显著的产量和品质优势^[11-12],同时还能提高农业资源利用率,减少农药和化肥的施用,对可持续农业发展有重要价值。在中国,由于近年来马铃薯主粮化,玉米为第一大粮食作物,玉米马铃薯间作模式对国家粮食生产和粮食安全的保障有重要贡献。目前,已有研究表明该模式能够提高对异质性养分的利用^[13]。因此,以玉米马铃薯间作模式为研究对象,探讨玉米马铃薯

薯间作系统对氮、磷、钾异质性养分的利用特征,明确异质性养分的吸收和利用效率,以期为生产实践提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南农业大学现代农业教育科研基地(N25°31'07", E103°16'41"),海拔1 860 m,属亚热带高原季风气候,年平均气温14.7℃,年均降水量960.0 mm。该地区土壤为水改旱红壤,前茬作物为蚕豆。土壤基本肥力状况为有机质含量17.9 g/kg,全氮0.08 g/kg,水解性氮53.07 mg/kg,全磷0.09 g/kg,有效磷17.49 mg/kg,全钾2.16 g/kg,有效钾117.25 mg/kg, pH 7.6。

1.2 试验设计

试验采用单因素的田间设计,由不同种植方式(玉米单作、马铃薯单作和玉米马铃薯间作)和不同养分分布(均质性、异质性)设计7个处理,分别为:DJ玉米—玉米单作均质(每行施肥)、DJ马铃薯—马铃薯单作均质(每行施肥)、DY玉米—玉米单作异质(隔行施肥)、DY马铃薯—马铃薯单作异质(隔行施肥)、JJ—间作均质(每行施肥)、ZJ—间作异质(种间行施肥)和ZN—间作异质(种内行施肥)。各处理重复3次。供试玉米(*Zea mays* L.)品种寻单7号为试验地所在区域的主栽品种,供试马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种会-2号为适用于间作的主栽品种。

试验于2015年4—10月进行。不论单作还是间作,两作物的种内和种间行距均为40 cm,株距为30 cm,玉米和马铃薯单作时密度均为83 333株/hm²,间作时均为41 666株/hm²,小区面积8 m×9.6 m;其中间作含6个带幅;有机肥

以 4 500 kg/hm² 作为底肥施入, 控释性复合肥作为追肥在玉米四叶期一次性投入 (控释性复合肥 600 kg/hm²), 其中均质性施肥为每行施肥 0.2 kg, 异质性施肥为每行施肥 0.4 kg; 试验期间, 每半个月进行 1 次除草, 同时浇水和病虫害防治。其他田间管理措施与当地生产实践保持一致。

作物生长至初花期时, 采集样品并测定各项指标。在小区内随机选取玉米和马铃薯各 10 株, 齐地面截取地上部分, 然后将茎叶分离; 接着以植株为中心, 分别平行和垂直于种植行向选取 40 cm × 30 cm 的样方, 用铁锹完整取出 25 cm 深土体内的根系, 并在自来水下冲洗干净。待地上和地下植株样均获得后, 将其分为叶片、茎秆 (含叶柄)、穗、块茎和根系, 鲜样于 105 ℃ 杀青 30 min, 70 ℃ 烘至恒重, 称干重, 粉碎装入自封袋备用。N 采用凯氏定氮法、P 采用钒钼黄比色法、K 采用火焰光度法测定其含量。

在植株各部分生物量和养分含量的基础上, 进行养分积累量 (nutrient accumulation)、养分利用效率 (nutrient use efficiency, NUE) 和土地当量比 (land equivalent ratio, LER) 的计算。养分积累量代表了植物对养分的吸收能力, 计算公式为:

养分积累量 (g)=养分质量分数 (g/kg)×生物量 (kg)。

养分利用率用于衡量植物对养分异质性的转化率即养分效率比, 计算公式为:

养分利用率 (g/g)=经济产量 (或生物量)/植物所吸收的养分量。

复合产量强调的是间作时原粮的总产量 (马铃薯产量与原粮折算按 5 : 1):

复合产量 (kg)=间作玉米产量 (kg)+1/5 间作马铃薯产量 (kg)。

当量比用于评估间作产量优势, 以衡量不同种间作用方式下两作物的总生产力及其优势, 计算公式为:

$$LER = (Y_{amix}/Y_{amono}) + (Y_{bmix}/Y_{bmono})。$$

式中, Y_{amix} 和 Y_{bmix} 分别表示间作时 a 和 b 作物在间作时的产量, Y_{amono} 和 Y_{bmono} 分别表示单作 (单株) 种植时 a 和 b 作物的产量。较大的 LER 值表征较高的相对生产力。

1.3 数据分析

试验数据用 Excel 2012 软件进行计算、整理和图形处理。采用 SPSS 19.0 进行两因素的方差

分析和处理均值间的多重比较 (LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对植株养分吸收量的影响

玉米单作条件下, 氮、钾养分在玉米植株中积累情况相似, 差异不显著, 总体上表现为单作异质施肥单株玉米氮、钾养分积累量大于均质施肥, 说明异质性施肥能够提高玉米对氮、钾养分吸收积累; 与单作相比, 间作条件下养分异质性明显增加了玉米养分积累, 且玉米氮 ($P=0.007$) 养分积累量 JJ 与 ZJ、ZN 差异显著, 磷积累量 JJ 和 ZN 差异显著 ($P=0.018$), 氮、磷养分积累量种内高肥条件下最大, 比间作均质施肥分别提高了 16.6%, 46.3% (表 1)。钾养分含量在种间高肥条件下最大, 但未达到显著差异, 比间作均质施肥增加 7.5%。

表 1 土壤养分空间异质性对单株玉米养分积累量的影响
Tab. 1 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the nutrient accumulation amount per plant of maize

处理 treatment	养分积累量/g nutrient accumulation amount		
	N	P	K
DJ	2.27±0.09 c	0.56±0.04 ab	2.81±0.11 b
DY	2.45±0.08 c	0.50±0.04 ab	3.01±0.13 b
JJ	1.63±0.09 a	0.41±0.03 a	1.87±0.10 a
ZJ	1.91±0.08 b	0.53±0.04 ab	2.01±0.08 a
ZN	1.99±0.08 b	0.60±0.06 b	1.96±0.08 a

注: (1) 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (LSD 检验, $P \leq 0.05$)。 (2) DJ. 单作均质; DY. 单作异质; JJ. 间作均质; ZJ. 种间施肥; ZN. 种内施肥, 单作处理与间作处理分别进行方差显著性分析, 下同。

Note: (1) Values followed by different letters in a row are significantly different among treatments (LSD test, $P \leq 0.05$). (2) DJ. monocropping homogeneity fertilization; DY. monocropping heterogeneity fertilization; JJ. intercropping homogeneity fertilization; ZJ. interspecific crossing fertilization; ZN. intraspecific fertilization, the results of variance were analyzed by single processing between monocropping and intercropping; the same as below.

无论单作还是间作, 养分异质性对马铃薯养分积累量的影响均小于玉米, 只有单作条件下钾的养分积累量得到显著提高, 其他处理未达到显著水平 (表 2)。单作时, 钾的养分积累量得到显著提高, 其他处理未达到统计显著水平。间作时养分 (氮、磷和钾) 积累量为种间施肥>间作均质>种内施肥, 其中种间施肥马铃薯单株氮、磷和钾养分积累量比间作种内施肥增加 19.2%、19.5% 和 16.2%。这表明种内施肥抑制了作物对养分的

吸收的原因可能是种内竞争导致作物养分吸收能力下降。

表 2 土壤养分空间异质性对单株马铃薯养分积累量的影响

Tab. 2 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the nutrient accumulation amount per plant of potato

处理 treatment	养分积累量/g nutrient accumulation amount		
	N	P	K
DJ	1.88±0.15 a	0.68±0.05 a	3.13±0.24 a
DY	2.21±0.14 a	0.79±0.06 a	3.95±0.24 b
JJ	2.67±0.20 a	0.82±0.06 a	4.57±0.35 c
ZJ	2.73±0.26 a	0.98±0.11 a	4.89±0.57 c
ZN	2.29±0.13 a	0.81±0.06 a	4.21±0.29 c

2.2 不同处理对养分利用率的影响

在单作条件下, 氮、钾养分在玉米植株中的利用情况相似, 未达到显著差异, 而磷养分利用率则表现相反, 也未达到显著差异, 表明养分异质性能抑制氮和钾养分向生物量的转化; 在间作中, 间作均质处理极显著提高了氮 ($P<0.01$)、磷 ($P<0.01$) 和钾 ($P<0.01$) 的利用率, 且单株玉米氮和磷利用率趋势均表现为间作均质施肥>种间施肥>种内施肥, 钾利用率趋势为均质施肥>种内施肥>种间施肥, 养分异质条件下, 种间施肥能提高玉米对氮和磷利用率, 却抑制了钾的利用率, 说明养分异质性对不同养分元素影响也不尽相同 (表 3)。总体而言, 养分异质性没有提高玉米养分利用率, 反而均质施肥更有利于养分转化成生物量。

表 3 土壤养分空间异质性对单株玉米养分利用率的影响

Tab. 3 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the nutrient use efficiency per plant of maize

处理 treatment	养分利用率/(g·g ⁻¹) maize nutrient use efficiency		
	N	P	K
DJ	81.94±1.81 a	385.41±29.57 a	66.22±1.33 a
DY	78.74±0.59 a	421.44±19.37 a	65.18±1.21 a
JJ	115.30±2.34 c	468.17±17.26 b	98.16±1.07 d
ZJ	90.85±2.12 b	364.14±21.69 a	85.47±1.32 b
ZN	89.32±1.46 b	351.48±20.49 a	91.14±0.48 c

单作养分异质性未显著提高马铃薯养分的利用率, 相反异质性施肥对马铃薯养分利用率 (氮和钾) 有一定的降低作用 (表 4)。在间作不同施肥处理中, 氮和钾利用率情况相似, 表现为间作种

间施肥>种内施肥>间作均质, 种间施肥马铃薯氮和钾利用率比间作均质分别增加 7.2% 和 5.6%, 但磷利用率表现为间作均质施肥>种间施肥>种内施肥, 且均质施肥和异质施肥显著差异 ($P=0.016$)。

表 4 土壤养分空间异质性对单株马铃薯养分利用率的影响

Tab. 4 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the nutrient use efficiency per plant of potato

处理 treatment	养分利用率/(g·g ⁻¹) nutrient use efficiency		
	N	P	K
DJ	49.17±2.22 a	135.71±2.43 b	29.34±0.96 b
DY	44.64±1.28 a	126.29±3.21 a	25.35±1.24 a
JJ	47.67±1.41 a	155.16±1.24 c	27.87±0.85 b
ZJ	51.08±1.69 a	145.53±2.59 b	29.42±0.97 b
ZN	50.82±1.41 a	145.28±3.56 b	28.33±1.48 b

2.3 作物生产力特征

与传统均质性施肥相比, 异质性施肥未显著 ($P>0.05$) 提高玉米和马铃薯生物量 (表 5)。在单作玉米不同施肥方式中, 异质施肥叶生物量比均质施肥处理显著提高 ($P=0.029$), 其他器官生物量变化不显著, 但整体趋势均表现为单作异质养分玉米各器官生物量大于单作均质, 表明异质施肥能够促进单作玉米地上部生物量的积累; 间作处理中, 玉米各器官生物量及总生物量未达到显著差异, 且养分异质性降低了玉米总生物量, 说明间作异质施肥不利用玉米生物量的积累。

从表 5 可见: 单作条件下, 异质性施肥对马铃薯叶、茎和根生物量的影响一致, 表现为单作异质性施肥处理的生物量大于单作均质性施肥处理, 但块茎生物量表现相反, 表明养分异质对马铃薯块茎形成有一定的不利作用, 单作异质施肥有利于马铃薯地上部生物量的形成; 间作异质性施肥马铃薯各器官生物量 (除根系外) 及总生物量未达到显著差异。但从趋势上看, 表现为种间施肥各器官生物量及总生物量最大, 尤其种间施肥马铃薯根系生物量显著提高, 比均质施肥和种内施肥分别增加 16.7% 和 31.3%, 这与间作玉米根系生物量恰好相反。由此可见, 种间施肥能够提升马铃薯生物量的积累。

从表 6 可见: 在间作条件下, 施肥方式显著影响作物产量。对于玉米, 单作时异质性施肥不仅没有增加产量, 反而产生了消极作用, 而间作时种间异质性施肥显著提高产量 ($P=0.038$), 其中

表 5 土壤养分空间异质性对玉米马铃薯干物质积累与分配的影响

Tab. 5 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the substance's accumulation and distribution of dry maize and potatoes

作物 crop	处理 treatment	叶 leaf	茎秆 stalk	穗 panicle	根系 root	整株 whole plant
玉米 maize	DJ	72.6±2.1 a	77.1±2.6 a	26.1±2.0 a	8.6±0.5 a	184.5±6.6 a
	DY	79.4±2.1 b	77.1±2.8 a	27.9±1.6 a	8.7±0.4 a	192.8±6.2 a
	JJ	65.4±2.7 a	75.0±3.3 a	31.1±3.1 ab	12.0±0.8 b	183.5±9.3 a
	ZJ	65.9±1.8 a	69.2±2.6 a	24.6±2.5 a	11.6±0.8 b	171.2±6.5 a
	ZN	62.3±1.9 a	69.5±2.5 a	33.4±3.0 ab	12.3±4.1 b	177.5±6.9 a
作物 crop	处理 treatment	叶 leaf	茎秆 stalk	块茎 tuber	根系 root	整株 whole plant
马铃薯 potato	DJ	19.6±2.1 a	37.5±3.5 a	33.7±5.8 a	2.0±0.2 b	92.7±8.0 a
	DY	22.6±3.1 a	45.5±2.9 a	27.3±3.8 a	2.3±0.2 b	97.7±5.4 a
	JJ	21.8±2.1 a	50.6±4.2 b	52.8±6.3 b	1.8±0.2 ab	127.0±9.7 b
	ZJ	23.8±3.6 a	54.6±6.8 b	60.7±8.5 b	2.1±0.2 b	141.2±15.0 b
	ZN	17.6±1.1 a	47.2±3.4 b	49.9±4.7 b	1.6±0.1 a	116.2±7.2 b

表 6 土壤养分空间异质性对玉米马铃薯产量的影响

Tab. 6 The influences of nutrients spatial heterogeneity on the yield of maize and potatoes

处理 treatment	产量/(kg·hm ⁻²) yield		复合产量/kg compound yield	土地当量比 land equivalent ratio
	玉米 maize	马铃薯 potato		
DJ	11 676±198 a	22 306±1 445 a	—	—
DY	11 168±210 a	22 626±639 a	—	—
JJ	12 119±723 b	22 040±691 a	8 264±389 a	1.014±0.005 a
ZJ	13 997±166 c	25 028±913 b	9 501±65 b	1.181±0.031 c
ZN	13 229±256 bc	22 574±562 ab	8 871±146 ab	1.091±0.015 b

种间行施肥比均质产量提高达 15.5%；对于马铃薯，在单作和间作条件下，异质施肥均可提高其产量，但统计上仅间作种间施肥马铃薯产量显著高于 JJ 处理 ($P=0.042$)。在间作条件下，由于间作异质施肥(种间高肥，种内高肥)提高了玉米和马铃薯产量，间作异质性施肥复合产量均高于间作均质施肥。而间作种间施肥复合产量高于间作种内施肥，且显著高于间作均质施肥 ($P=0.031$)，间作种间施肥复合产量 9 501 kg/hm²，比间作种内和间作均质分别提高 7.1% 和 15.0%。综合来看，玉米马铃薯间作有较为明显的间作优势，间作中不同施肥处理土地当量比 (LER) 均大于 1，说明相对于单作体系，无论均质养分还是异质养分，仍表现出间作产量优势，提高土地生产力。间作处理不同施肥方式土地当量比处理间差异均达到了极显著水平 ($P=0.003$)，LER 大小表现为间作种间高肥>间作种内高肥>间作均质，间作均质施肥 LER 显著低于间作异质施肥处理(种间高肥、种内高肥)，说明间作条件下异质性施肥，尤其是

种间高肥能进一步提高间作群体的间作优势。

3 讨论

本研究通过大田试验，探讨了作物多样性群体对土壤养分空间异质性的响应特征，发现土壤养分空间异质性能够增加作物养分积累量，降低植株养分利用率，并促进作物生长。研究工作深化了对植物多样性群体生产力优势形成机制的认识和土壤养分利用规律的了解。

与单一种植的作物群体相比，多样性种植模式下，作物对异质性养分吸收能力的增强可能与种间互作有关^[14-15]。种间互作能够促进根系的生长，包括增加根系数量和长度^[16-17]，优化根系构型^[18]，还促进根系的活力^[19]，延长根系寿命^[20]等。这些过程提高作物吸收养分的速度、面积和时长。其次，当异质性养分呈斑块分布时，根系的趋肥性更突出，从而更高效地吸收养分^[21-22]。值得一提的是，单作玉米养分积累量高于间作养分积累，而间作马铃薯养分积累量高于单作马铃

薯养分积累,一方面原因可能是马铃薯生育期短,前期生长速率较快,在开花期马铃薯处于间作优势期,马铃薯干物质积累量已接近最大化,能吸收更多的养分并保存起来,叶片随着马铃薯的衰老而脱落,进一步将养分归还给土壤;另一方面,后期间作玉米恢复性生长,对养分的吸收能力增强导致间作玉米与马铃薯对养分的积累量呈现相反的趋势,但是这也在一定程度上体现玉米马铃薯间作群体的互补优势。除此之外,本研究中种间互作并未提高作物对异质性养分利用率。理论上,种间互作提高了作物对环境的适应能力,植物势必能够分配更多的资源在生长和繁殖上,从而提高养分的利用率。这一矛盾现象可能是养分吸收量优势过于明显,以至于掩盖了养分利用率提高的贡献,因为养分利用效率与吸收量在数量关系上存在内在联系^[23-24]。

如果作物多样性群体提高对异质性养分的吸收量是一个普遍现象,那么本研究的发现对于指导农业生产具有重要意义。首先,集约型可持续农业是当前中国农业发展的重要趋势,在不增加肥料投入的情况下,通过间套作和异质性施肥,提高养分的吸收量,有助于降低因养分流失导致的农田面源污染^[25]。其次,通过异质性施肥,间套作相对于单作更适应高养分投入^[26];再者,增加养分吸收量是提高植株内含物和改善农产品品质的重要途径。因此,间作条件下异质性施肥能显著提高农作物的品质,改善其营养价值,实现农业生产的提质增产^[11,27]。最后,增加养分吸收不仅直接提高作物的产量和品质,也间接增强作物对各种环境因子胁迫的适应,例如增加对病虫害的抗性,提高对干旱和冷害等的适应,从而有利用保障作物生产的稳定性,降低农药和其他农业资源(如地膜、保水剂)等投入,促进农业可持续性^[28-29]。

尽管作物多样性群体中异质性施肥能够提高作物生长和养分吸收量,但这一优势决定于施肥位置,即当肥料施于种间行时,优势得以体现,而施于种内行时,优势并不明显。这一研究结果与前人的结论^[12]一致,表明施肥位置是调节间作作物利用异质性养分的重要因素,其潜在的调节机制可能与作物间的相互作用有密切关系,不同作物种类间套作搭配可能产生不同的结果,其作用机理及其对异质性养分的利用值得进一步研究。

4 结论

本研究探讨了玉米和马铃薯间作对异质性养分的利用特征,明确了异质性养分在单作和间作条件下对玉米和马铃薯干物质积累量的影响。(1)在单作条件下,异质性施肥能增加玉米和马铃薯的干物质和养分积累量,降低养分利用率,但对产量的影响不明显。(2)在间作条件下,种间高肥对于增加玉米马铃薯干物质积累、养分积累以及作物产量具有显著作用,无论是种间高肥还是种内高肥都降低了玉米马铃薯的养分利用率。(3)间作条件下的养分异质性(种间高肥)促进玉米马铃薯干物质、养分的积累以及产量的增加效应优于单作处理,说明间作与土壤养分空间异质性具有协同作用。(4)除此之外,异质性养分促进间作优势主要表现为土壤养分空间异质性促进作物对养分的吸收利用,而不是提高作物对养分的利用率。

[参考文献]

- [1] JACKSON R B, CALDWELL M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics[J]. *Ecology*, 1993, 74(2): 612. DOI: [10.2307/1939320](https://doi.org/10.2307/1939320).
- [2] HODGE A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x).
- [3] LECOMPTE F. Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce-tomato rotation under a greenhouse[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(3): 811. DOI: [10.1007/s13593-011-0047-8](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0047-8).
- [4] EILTS J A, MITTELBACH G G, REYNOLDS H L, et al. Resource heterogeneity, soil fertility, and species diversity: effects of clonal species on plant communities[J]. *The American Naturalist*, 2011, 177(5): 574. DOI: [10.1086/659633](https://doi.org/10.1086/659633).
- [5] MOMMER L, VISSER E W, RUIJVEN J, et al. Contrasting root behaviour in two grass species: a test of functionality in dynamic heterogeneous conditions[J]. *Plant and Soil*, 2011, 344(1/2): 347. DOI: [10.1007/s11104-011-0752-8](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0752-8).
- [6] MOMMER L, VAN RUIJVEN J, JANSEN C, et al. Interactive effects of nutrient heterogeneity and competition: implications for root foraging theory?[J]. *Functional Ecology*, 2012, 26(1): 66. DOI: [10.1111/j.1365-2435.2011.01916.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01916.x).
- [7] GARCÍA-PALACIOS P, MAESTRE F T, GALLARDO A. Soil nutrient heterogeneity modulates ecosystem responses to changes in the identity and richness of plant functional groups[J]. *The Journal of Ecology*, 2011,

- 99(2): 551. DOI: [10.1111/j.1365-2745.2010.01765.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01765.x).
- [8] TYLIANAKIS J M, RAND T A, KAHMEN A, et al. Resource heterogeneity moderates the biodiversity-function relationship in real world ecosystems[J]. PLoS Biology, 2008, 6(5): 947. DOI: [10.1371/journal.pbio.0060122](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060122).
- [9] ESKANDARI H, GHANBARI A. Environmental resource consumption in wheat (*Triticum aestivum*) and bean (*Vicia faba*) intercropping: comparison of nutrient uptake and light interception[J]. Notulae Scientia Biologicae, 2010, 2(3): 100. DOI: [10.15835/nsb234787](https://doi.org/10.15835/nsb234787).
- [10] NWAOGU E N, UDEALOR A, ONYEMUWA I I. Effect of soybean population and spatial arrangement on nutrient uptake and production of ginger/soybean intercrop in south-eastern Nigeria[J]. Nigerian Agricultural Journal, 2010, 41(1): 83.
- [11] 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. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2008.05.008](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.05.008).
- [12] WU K X, FULLEN M A, AN T X, 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. DOI: [10.1016/j.fcr.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.002).
- [13] WU B Z, FULLEN M A, LI J B, et al. Integrated response of intercropped maize and potatoes to heterogeneous nutrients and crop neighbours[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 185. DOI: [10.1007/s11104-013-1865-z](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1865-z).
- [14] BARTELHEIMER M, STEINLEIN T, BEYSCHLAG W. Aggregative root placement: a feature during interspecific competition in inland sand-dune habitats[J]. Plant and Soil, 2006, 280(1/2): 101. DOI: [10.1007/s11104-005-2612-x](https://doi.org/10.1007/s11104-005-2612-x).
- [15] TRINDER C, BROOKER R, DAVIDSON H, et al. Dynamic trajectories of growth and nitrogen capture by competing plants[J]. The New Phytologist, 2012, 193(4): 948. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2011.04020.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.04020.x).
- [16] GROSS K L, PETERS A, PREGITZER K S. Fine root growth and demographic responses to nutrient patches in four old-field plant species[J]. Oecologia, 1993, 95(1): 61. DOI: [10.1007/BF00649507](https://doi.org/10.1007/BF00649507).
- [17] LI H B, ZHANG F S, SHEN J B. Contribution of root proliferation in nutrient-rich soil patches to nutrient uptake and growth of maize[J]. Pedosphere, 2012, 22(6): 776. DOI: [10.1016/S1002-0160\(12\)60063-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60063-0).
- [18] HUTCHINGS M J, JOHN E A, WIJESINGHE D K. Understanding the consequences of soil heterogeneity for plant populations and communities[J]. Ecology, 2003, 84(9): 2322. DOI: [10.1890/02-0290](https://doi.org/10.1890/02-0290).
- [19] EINSMANN J C, JONES R H, PU M, et al. Nutrient foraging traits in 10 co-occurring plant species of contrasting life forms[J]. Journal of Ecology, 1999, 87(4): 1365.
- [20] PREGITZER K S, HENDRICK R L, FOGEL R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen[J]. New Phytologist, 1993, 260(2): 1469.
- [21] MCNICKLE G G, ST CLAIR C C, CAHILL J F. Focusing the metaphor: plant root foraging behaviour[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(8): 419. DOI: [10.1016/j.tree.2009.03.004](https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.004).
- [22] MUELLER K E, TILMAN D, FORNARA D A, et al. Root depth distribution and the diversity-productivity relationship in a long-term grassland experiment[J]. Ecology, 2013, 94(4): 787. DOI: [10.1890/12-1399.1](https://doi.org/10.1890/12-1399.1).
- [23] 李隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 140. DOI: [10.3321/j.issn:1008-505X.2000.02.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:1008-505X.2000.02.003).
- [24] 夏海勇, 赵建华, 王志刚, 等. 间套作和施磷对玉米籽粒磷质量分数和体内磷素分配及利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 67.
- [25] 湛方栋, 傅志兴, 杨静, 等. 滇池流域套作玉米对蔬菜农田地表径流污染流失特征的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 847.
- [26] 吴开贤, 安瞳昕, 范志伟, 等. 土壤氮异质性与种间地上竞争对玉米和马铃薯生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1571.
- [27] MYUNGSYUN S, SEONGYOUL C, SANGKUN P, et al. Growth responses and nutrient absorption characteristics of ardisia pot plants in two growth stages as influenced by nutrient solution strengths[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2009, 50(6): 525.
- [28] TREWAVAS A. Green plants as intelligent organisms[J]. Trends in Plant Science, 2005, 10(9): 413. DOI: [10.1016/j.tplants.2005.07.005](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.07.005).
- [29] KARBAN R. Plant behaviour and communication[J]. Ecology Letters, 2008, 11(7): 727. DOI: [10.1111/j.1461-0248.2008.01183.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01183.x).

责任编辑: 何承刚