

油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对P、Fe、Zn养分吸收利用特征的影响

岳骞, 纪正青, 盛婧, 许乃霞, 朱普平, 王鑫, 宗焦, 郭智, 李庆魁, 朱曦

引用本文:

岳骞, 纪正青, 盛婧, 许乃霞, 朱普平, 王鑫, 宗焦, 郭智, 李庆魁, 朱曦. 油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对P、Fe、Zn养分吸收利用特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1928–1935.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1287>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

间作对莎草与蚕豆体内铅镉锌化学形态分布的影响

于保港, 秦丽, 湛方栋, 祖艳群, 李博, 王吉秀, 李元

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 621–631 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1483>

超富集植物与能源植物间作对Cd、Pb、Zn累积的影响

张杏锋, 吴萍, 冯健飞, 郭越宏, 高波

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1481–1491 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1415>

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 347–354 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0916>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王风, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907–914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>

玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响

闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 林大松, 王雅君, 徐应明, 王瑞刚

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2162–2171 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0639>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

岳骞, 纪正青, 盛婧, 等. 油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对P、Fe、Zn养分吸收利用特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1928–1935.

YUE Q, JI Z Q, SHENG J, et al. Effects of rapeseed intercropped with chickpea and lupin on P, Fe, Zn absorption and utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 1928–1935.

油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对P、Fe、Zn养分吸收利用特征的影响

岳骞¹, 纪正青², 盛婧^{1*}, 许乃霞^{2*}, 朱普平¹, 王鑫¹, 宗焦¹, 郭智¹, 李庆魁², 朱曦²

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/江苏省农业生物多样性培育与利用研究中心, 南京 210014; 2. 苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215008)

摘要:为研究油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对土壤养分P、Fe、Zn的吸收利用特征及其影响因素,通过盆栽试验,设置6个处理,包括对照(CK)、鹰嘴豆单作(CP)、羽扇豆单作(LU)、油菜单作(RA)、油菜与鹰嘴豆间作(RA/CP)、油菜与羽扇豆间作(RA/LU)。结果表明:油菜/鹰嘴豆间作的地上部生物量和P、Zn养分吸收总量均为最高,其生物量比油菜单作、鹰嘴豆单作均提高约74%,P吸收总量比油菜单作和鹰嘴豆单作显著提高76.5%和113.9%,地上部植株Fe、Zn吸收总量相比于单作最高提升比例分别达到270%和121%。油菜/鹰嘴豆、油菜/羽扇豆间作使油菜根际土有效P含量分别提升33.8%和50.4%,而对鹰嘴豆和羽扇豆的根际有效P提升强度并不明显。间作均不同程度促进两种作物根际土有机酸的含量,其中油菜/羽扇豆间作处理下的油菜作物根际土有机酸总量提升幅度最大,是单作作物的1.6倍。研究表明,油菜与鹰嘴豆、羽扇豆两种豆科作物间作均可以提高油菜植株生物量和植株对P、Fe、Zn养分的吸收,其中油菜与鹰嘴豆间作的养分吸收利用强度更佳。

关键词:间作;生物量;油菜;有效磷;有机酸;根际

中图分类号:S565.4;S529;S681.9 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)09-1928-08 doi:10.11654/jaes.2022-1287

Effects of rapeseed intercropped with chickpea and lupin on P, Fe, Zn absorption and utilization

YUE Qian¹, JI Zhengqing², SHENG Jing^{1*}, XU Naixia^{2*}, ZHU Puping¹, WANG Xin¹, ZONG Jiao¹, GUO Zhi¹, LI Qingkui², ZHU Xi²

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Agricultural Biodiversity Cultivation and Utilization Research Center, Nanjing 210014, China; 2. Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Jiangsu 215008, China)

Abstract: Intercropping is an important method for improving nutrient utilization. In this study, a pot experiment was conducted with six treatments: control (CK), *Cicer arietinum* (CP), *Lupinus* (LU), *Brassica napus* (RA), intercropping of *Cicer arietinum*/*Brassica napus* (RA/CP), and intercropping of *Lupinus*/*Brassica napus* (RA/LU), to investigate the characteristics of P, Fe, and Zn uptake and utilization, and their traits influencing different intercropping treatments. The results showed that the aboveground biomass, and total P and Zn uptake in the RA/CP treatment were the highest, with a biomass increase of approximately 74% compared with RA and CP treatments, and an increase in total P uptake of 76.5% and 113.9% compared with RA and CP, respectively. The total Fe and Zn uptake in the aboveground parts of intercropping were notably increased by 270% and 121%, respectively, compared with the monoculture. In addition, RA/CP and

收稿日期:2022-12-20 录用日期:2023-04-04

作者简介:岳骞(1990—),女,博士,助理研究员,从事农业生态研究。E-mail:yueqian2@hotmail.com

*通信作者:盛婧 E-mail:nkysj@hotmail.com; 许乃霞 E-mail:804925310@qq.com

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41907073);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2002);江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2021]384)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (41907073); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(22)2002); Jiangsu Agricultural Industrial Technology System Construction Project(JATS[2021]384)

RA/LU treatments notably increased the available phosphorus content in the rhizosphere soil of rape crops, increasing by 33.8% and 50.4%, respectively, while the activation for chickpea or lupin was not obvious. Furthermore, crop intercropping increased organic acid secretion in rhizosphere soils. The total amount of organic acids in the rape rhizosphere under the RA/LU treatment was 1.6 times higher than that of the monoculture. Overall, intercropping rape with chickpea and lupin could promote the formation of aboveground plant biomass and P, Fe, and Zn nutrient accumulation in plants, particularly rape. The RA/CP had the strongest effect on soil nutrient absorption and utilization.

Keywords: intercropping; biomass; rape crops; available phosphorus; organic acid; rhizosphere

土壤中营养元素的充分供应是保障农产品产量与品质的重要条件。磷(P)元素是植物进行光合作用和根系发展所需的重要营养元素,对植物生长和发育起着关键作用^[1]。微量元素铁(Fe)、锌(Zn)是作物呼吸、氮代谢、激素合成等不可或缺的元素^[2],此外其对作物的品质提升也具有关键作用^[3]。现代农业生产过程中,作物品种的研究偏重于高产,高产的实现往往伴随着化学肥料的大量投入,这也导致了土壤养分总量盈余,而且化肥有效性不高、利用率低等问题也进一步限制了农业的绿色高效生产^[4-5]。例如,Zhang等^[6]调查得到我国表层50 cm土壤中的平均总P密度约为 $830 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,而有效P密度仅为 $5.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中只有约0.6%能被植物吸收利用。Shen等^[4]和Macdonald等^[5]研究指出,中国东部地区P盈余量居全球首列,年盈余量达到 $10 \sim 13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。另外,Wei等^[7]提到土壤中全Fe含量范围在 $7 \sim 42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于作物对Fe的需要量,但约73%~96%的Fe以三价铁形式存在于土壤中,其可溶性较差,难以被植物吸收利用,进而导致土壤中Fe的有效性低以及植物缺Fe影响产量与品质。因此,如何活化并调控利用土壤Fe、Zn等微量元素养分库,是现代绿色高效集约化农业发展的重要技术之一。

P高效植物能够在缺P胁迫下通过增加根系分泌物量和增强根系形态来促进难溶性P以及难溶性矿物中Fe、Zn元素的活化与吸收,从而提高了P、Fe、Zn的有效性和利用率^[8]。例如,羽扇豆在缺P条件下会形成特有的排根,排根是由像瓶刷一样的很多簇表面布满一层密集根毛的次级侧根组成,不仅可合成有机酸和磷酸酶,而且其吸收有机酸的速率也比非排根快^[9-10]。油菜在低P条件下也具备较强的P活化机制,能够通过提高根毛密度来增加养分吸收面积和分泌物数量,改变或增加根系有机酸与质子的释放特征,进而满足自身对P的活化并吸收^[9,11]。吕阳^[9]的研究表明,鹰嘴豆和羽扇豆的生长前期根系土壤酸性磷酸酶活性和有机酸浓度是玉米或油菜的1~10倍不等,

具备较强的养分活化功能。

作物间作是农田生物多样性调控的有效手段之一。间作不仅可以充分利用地上部光热资源,同时也可以通过地下部根系形态变化、根系分泌物,以及菌根间相互作用等过程促进土壤养分的活化与利用,从而实现相比于单作的产量与品质优势^[12-14]。例如:研究报道鹰嘴豆与玉米间作可以明显促进玉米地上部的总吸P量,提升幅度高达42%^[15];油菜与紫云英间作后根系有机酸及其衍生物分泌量增加30%以上^[16]。目前,间作体系中养分高效利用的模式主要集中在P和微量元素活化能力强弱作物的搭配上,例如豆科与禾本科作物间作^[14],但两种P利用效率高的作物间作搭配对养分利用率的提升效应研究相对较少。

羽扇豆和鹰嘴豆具有较强的根际酸化能力,油菜也属于P高效作物,研究假设在油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作模式下,通过根际间根系与根系分泌物相互作用,能达到P、Fe、Zn养分吸收及利用效率进一步加强提升。因此,本文通过鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作处理,研究不同间作模式的地上部植株生物量、植株养分累积量,以及植株根际土有效养分含量的差异与特征,并监测根际土有机酸分泌种类与浓度,筛选具备P高效吸收利用的间作模式,为基于农田生物多样性生态调控的养分高效利用提供新的技术途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自江苏省常州市新北区,属于水稻土类型,质地为砂质壤土,pH值6.4,有机质 $23.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全P $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $87.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效P $13.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $68.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效Fe $72.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效Zn $1.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方式,盆钵长50 cm、宽40 cm,净高25 cm,面积 0.2 m^2 ,每盆装30 kg干土,播种前一天装土,然后加水浸透。实验设置6个处理,包括对照

(CK)、鹰嘴豆单作(CP)、羽扇豆单作(LU)、油菜单作(RA)、油菜与鹰嘴豆间作(RA/CP)、油菜与羽扇豆间作(RA/LU),每个处理4个重复。

试验于2020年10月至2021年5月在江苏省农业科学院大棚进行,鹰嘴豆和羽扇豆播种均采用穴播方式,每盆4穴,每穴3粒,待苗长势稳定后间苗,最终保持单作鹰嘴豆、羽扇豆种植密度为每盆4株(1株1穴),油菜单作种植采用油菜育苗移栽方式,选取长势较一致的植株,每盆4株。间作种植规格分别是单作的1/2,即2株鹰嘴豆+2株油菜、2株羽扇豆+2株油菜。种植期间所有处理均不施肥,定期除草,水管理一致。

1.3 样品采集与指标测定

植株样品与土壤样品均采集于油菜成熟时,即2021年5月22日。首先测定植株地上部生物量,将盆栽地上部植株全部割取,称量并记录鲜质量;下一步烘干测定含水率;最后磨碎测定地上部植株总P及微量元素Fe、Zn含量。植株总P含量采用全自动流动分析仪SKALAR San++测定,称取约0.1 g样品,加入5 mL浓硫酸消解,消解完成后定容至100 mL,稀释10倍后上机测定;微量元素Fe、Zn含量采用ICP-MS分析仪测定,方法参照GB 5009.268—2016标准,称取0.5 g植株样品,加入5 mL硝酸,在120℃下消解30 min后定容至50 mL,再稀释10倍后上机测定。

根际土采用抖根法收集,主要参考吕阳^[9]和Pearse等^[17]的文献,轻取收集足够量的根际土(一般附着在根际表面0~5 mm的土都属于根际土),将根际土鲜样带回实验室4℃冰箱冷藏备用。根际土有机酸采用高效液相色谱仪测定,有机酸标液配制与色谱条件可参考李煜姗等^[18]的方法。用四分法分取一定量根际土风干,磨碎过20目筛测定养分含量。土壤微量元素Fe、Zn有效态含量采用ICP-MS分析仪测定,参考HJ 804—2016标准,称2.5 g土,按照水土比2:1,加入5 mL DTPA浸提液,于180 r·min⁻¹下振荡2 h,离心、稀释后上机测定;有效P含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法(HJ 704—2014)。

1.4 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2016进行数据整理、计算、分析以及相应图表绘制;采用IBM SPSS Statistics 22进行单因素方差分析(显著性水平 $P<0.05$,采用Duncan法进行多重比较);采用R语言Corrplot功能包^[19]进行相关性挖掘分析以及相应图表绘制。

2 结果与分析

2.1 间作对作物根际土P、Fe、Zn元素有效性的影响

如图1可知,鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作可促进根际土有效P含量的增加。油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作后油菜根际土有效P含量分别为17.9 mg·kg⁻¹和20.2 mg·kg⁻¹,显著高于单作RA的含量(13.4 mg·kg⁻¹),提升幅度分别高达33.8%和50.4%。相比于单作RA的根际土有效Zn含量(2.3 mg·kg⁻¹),油菜在RA/CP模式下根际土有效Zn含量显著提高,达到2.9 mg·kg⁻¹,但RA/LU模式的油菜根际土有效Zn含量无明显变化。对于根际土有效Fe含量,与油菜间作情况下的羽扇豆和鹰嘴豆植株的根际土有效Fe含量比单作模式均显著增加,分别从84.9 mg·kg⁻¹增加到104.5 mg·kg⁻¹和从72.5 mg·kg⁻¹增加到101.1 mg·kg⁻¹,但间作后的油菜与单作油菜的根际土有效Fe含量无明显差异。

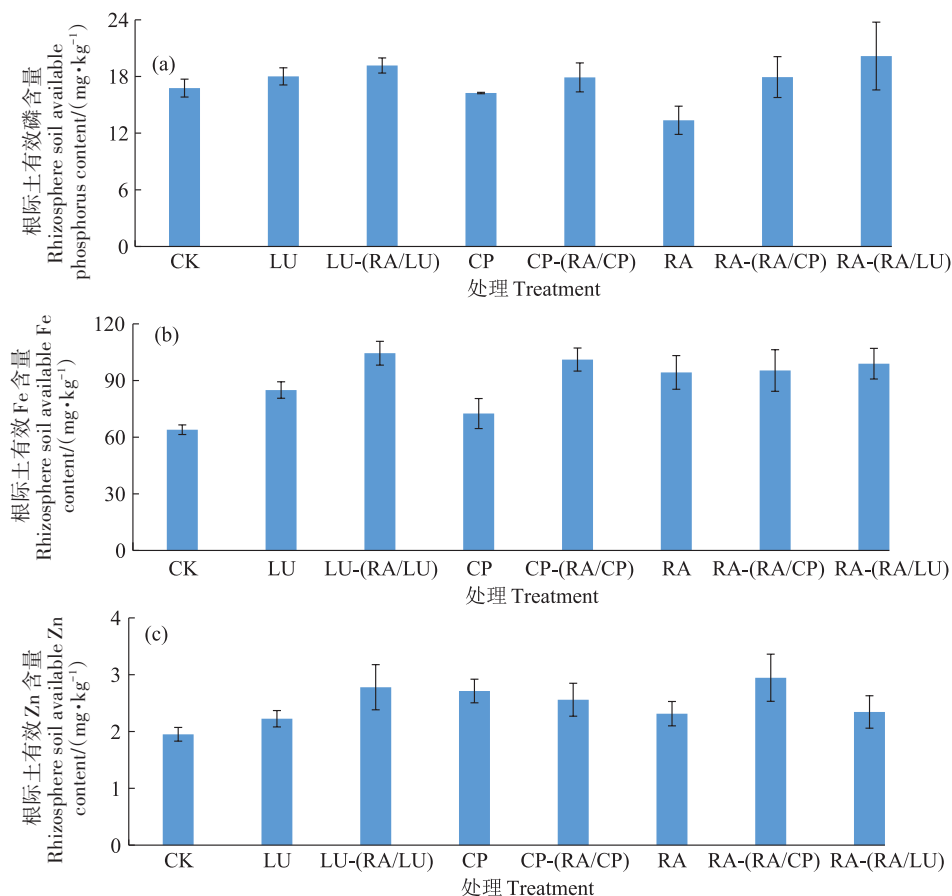
2.2 间作对作物根系有机酸分泌的影响

油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作均在不同程度上增强了作物根系有机酸的分泌,植株根际土有机酸总量相比单作植株根际土均有增加(图2)。油菜根际土有机酸总量从单作的7.6 μg·g⁻¹分别增加到间作的10.2 μg·g⁻¹(RA/CP)和20.6 μg·g⁻¹(RA/LU),其中主要表现为乙酸的分泌量增加,乙酸分泌量提升最高约10倍。与油菜间作后的羽扇豆和鹰嘴豆根际土有机酸含量相比单作也表现为增长趋势,但有机酸增加特征有所不同,鹰嘴豆间作后其根际土中琥珀酸的含量减少,乙酸的含量明显增加,而羽扇豆间作后其琥珀酸和乙酸的含量均增加。

对于不同有机酸种类,RA/LU和RA/CP两种间作方式均显著提升了作物根际土的乙酸含量,但乙酸含量占总有机酸的比例变化却不一致,其中油菜根际土乙酸含量占总有机酸的比例从59%(单作)分别提升到71%(RA/CP)和84%(RA/LU),鹰嘴豆间作后根际土乙酸含量比例提升33%,而羽扇豆间作后根际土乙酸含量比例却降低8%(但含量提升约2.5 μg·g⁻¹)。另外,RA/LU间作也明显增加了羽扇豆根际土甲酸的含量,含量从1.5 μg·g⁻¹增加到3.0 μg·g⁻¹,但占比略有降低。总体上,油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作可提高土壤有机酸含量并且改变了有机酸组分占比。

2.3 根际土养分与有机酸含量的相关性分析

本研究进一步分析了根际土养分有效性与有机酸含量的相关性。如图3所示,根际土有机酸总量与



LU-(RA/LU)和RA-(RA/LU)分别表示RA/LU间作处理下羽扇豆和油菜根际土养分含量;CP-(RA/CP)和RA-(RA/CP)分别表示RA/CP间作处理下鹰嘴豆和油菜根际土养分含量。下同。

LU-(RA/LU) and RA-(RA/LU) represented the nutrient content of lupine and rapeseed rhizosphere soil under RA/LU intercropping treatment; CP-(RA/CP) and RA-(RA/CP) represented nutrient content of rhizosphere soil of chickpea and rapeseed under RA/CP intercropping treatment. The same below.

图1 不同间作方式根际土有效P、有效Zn和有效Fe的含量

Figure 1 Available phosphorus, available Zn and available Fe content in rhizosphere soil for different treatments

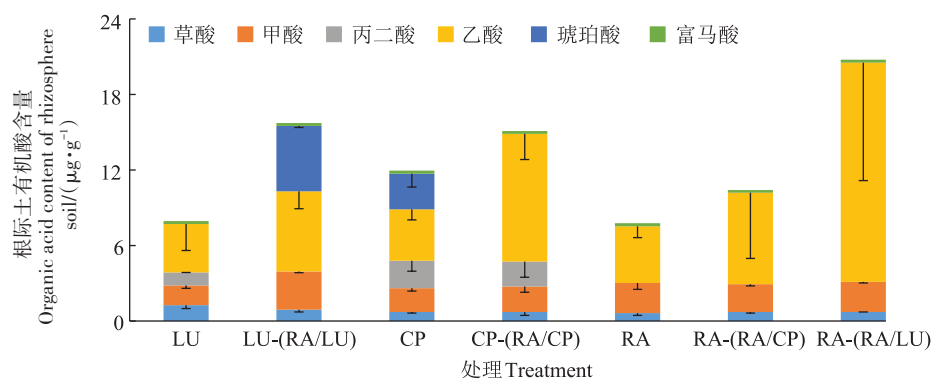


图2 不同间作模式下根际土有机酸含量及其组分差异

Figure 2 Effects of intercropping on organic acid content and contributions in rhizosphere soil

有效P含量有较强的正相关关系,相关系数为0.73;而与Fe、Zn有效态含量没有显著相关性。不同有机酸种类与不同养分有效态含量的相关性存在很大差异。根际土甲酸与有效P、有效Fe和有效Zn含量均表现出正相关,其中与有效Fe的相关系数最高,达到

0.69;而根际土富马酸与有效P、有效Fe和有效Zn含量表现出负相关。此外,有机酸总量与乙酸含量表现出显著的正相关关系,相关系数为0.86($P<0.05$)。

2.4 间作对植株地上部生物量的影响

RA/CP间作模式下植株地上部生物量最高,每盆



蓝色圈或字体表示正相关关系,红色圈或字体表示负相关关系;AP、Fe、Zn表示根际土有效P、有效Fe、有效Zn含量;OA、FOA、AA、FUA、PDA、SA、TA依次为草酸、甲酸、乙酸、富马酸、丙二酸、琥珀酸和有机酸总量。

The blue circle or font represented positive correlation, while the red meant negative correlation; AP, Fe and Zn indicated rhizosphere soil available phosphorus, Fe and Zn, respectively; OA, FOA, AA, FUA, PDA, SA, TA were expressed as oxalic acid, formic acid, acetic acid, fumaric acid, propane diacid, succinic acid, and total amount.

图3 土壤养分有效性与有机酸分泌的相关性分析

Figure 3 Correlation analysis between soil nutrient availability and organic acid concentration

总干质量为228.9 g,分别比单作RA和单作CP提高19.2%和3.9%;其次RA/LU间作的地上部植株生物量分别比单作RA和单作LU提高8.3%和62.3%(表1)。对于植株单株质量,RA/CP和RA/LU模式下的油菜单株地上部生物量(干质量)显著高于单作油菜,分别提升约1.4倍和1.2倍,但豆科作物的单株生物量均有所降低,下降幅度分别为52.2%(鹰嘴豆)和77.1%(羽扇

豆)。总体上,间作情况下油菜的生物量显著提升,其中RA/CP间作对油菜地上部生物量增加作用更强。

2.5 间作对植株P、Fe、Zn养分吸收量的影响

由表2可知,作物间作能够显著增加植株养分的含量。RA/CP间作均促进了鹰嘴豆和油菜植株的P、Fe、Zn养分含量,鹰嘴豆植株的Fe养分含量由单作下196.2 mg·kg⁻¹(CP)增加到359.5 mg·kg⁻¹[CP-(RA/CP)]、油菜Fe养分含量由单作的59.7 mg·kg⁻¹增加到103.2 mg·kg⁻¹;鹰嘴豆植株的P、Zn和Fe养分含量比单作分别提升44.4%、70.3%和83.2%。而RA/LU间作下,羽扇豆植株的微量元素Fe、Zn略有下降,而羽扇豆植株P含量有增加趋势,但均未达到显著水平;RA/LU间作下油菜植株的P和Fe含量相比于单作RA分别显著增加38.9%和59.1%,Zn含量无显著差异。

由于不同间作方式下植株生物量与养分含量的变化,植株地上部生物量的P、Fe、Zn吸收总量也有显著差异。对于植株P吸收量(图4a),RA/CP间作的植株地上部的P吸收总量最高,达到0.60 g·盆⁻¹,是单作RA和单作CP吸收量的2.14倍和1.76倍;其次RA/LU处理,P吸收总量为0.43 g·盆⁻¹,是单作RA和单作LU吸收量的1.53倍和3.91倍。对于植株Fe吸收量(图4b),RA/CP间作和单作CP的总吸收量相当(每盆约35 mg),但RA/CP间作相比于单作RA显著提高Fe吸收量3.76倍;RA/LU间作的每盆植株地上部Fe吸收总量为17.9 mg·盆⁻¹,比单作RA显著提高92%。对于植株Zn吸收量(图4c),RA/CP间作的每盆植株地上部Zn吸收总量最高,达为9.41 mg·盆⁻¹,显著高于单作RA的吸收量(4.26 mg·盆⁻¹)。

对于作物而言,RA/CP间作下的鹰嘴豆地上部P和Zn吸收总量比单作鹰嘴豆提高76.6%和10.0%(P<

表1 不同模式下的植株地上部生物量

Table 1 Variations of plants above-ground biomass under different systems

处理 Treatment	油菜 Rapeseed		豆科作物 Leguminous crops			总量 Total		
	单株干质量 Dry weight per plant/g	提升幅度 Increase range/%	单株干质量 Dry weight per plant/g		提升幅度 Increase range/%	提升幅度 Increase range/%		
			鹰嘴豆 Chickpea	羽扇豆 Lupin		与RA对比 Comparison with RA	与CP对比 Comparison with CP	与LU对比 Comparison with LU
RA	39.0b							
CP			44.8a					
RA/CP	93.0a	138.4	21.4b		-52.2	228.9a	19.2	3.9
LU				26.0a		104.1c		
RA/LU	84.5a	116.5		6.0b	-77.1	180.9ab	8.3	62.3
P	0.008		0.010	0.007		0.021		

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Data in the same column with different letters indicate significant differences(P<0.05).

表2 不同处理下的植株P、Fe、Zn含量变化特征

Table 2 Variation characteristics of plant P, Fe, Zn concentration for different treatments

项目 Item	处理 Treatment	养分含量 Concentration	对比单作的显著提升幅度 Significant increase compared with monoculture/%
P/ (g·kg ⁻¹)	RA	1.82b	
	RA-(RA/CP)	2.68a	50.0
	RA-(RA/LU)	2.47a	38.9
	CP	0.90b	
	CP-(RA/CP)	1.31a	44.4
	LU	0.17a	
	LU-(RA/LU)	0.23a	
	RA	59.7b	
Fe/ (mg·kg ⁻¹)	RA-(RA/CP)	103.2a	72.9
	RA-(RA/LU)	95.0a	59.1
	CP	196.2b	
	CP-(RA/CP)	359.5a	83.2
	LU	170.0a	
	LU-(RA/LU)	160.0a	
	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	27.3a	
	RA-(RA/CP)	31.9a	
	RA-(RA/LU)	30.1a	
	CP	47.8b	
	CP-(RA/CP)	81.3a	70.3
	LU	52.7a	
	LU-(RA/LU)	48.6a	

注:显著性分析是针对同种作物单作和间作之间的显著性差异。

Note: The significance analysis was aimed at the significant difference between monoculture and intercropping of the same crop.

0.05),但Fe的吸收总量降低-1.6%。LU/RA间作下的油菜植株P和Fe总量均显著高于单作油菜,而Zn总量没有显著差异。总体上,RA/CP间作下的地上部植株养分含量和累积总量均较高。

3 讨论

鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作处理显著增加了油菜植株的生物量和微量元素养分累积量,其中单株油菜地上部生物量提升可达1.3倍。与已有研究相比,肖靖秀等^[20]通过田间小区试验研究油菜与蚕豆间作,发现间作平均分别提高油菜和蚕豆产量15.6%~44.5%和12.1%~26.0%。周泉等^[21]研究发现油菜与紫云英间作能够提高油菜单株产量49%~59%。因此,鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作具备较高的生物量提升潜力。间作具备的生物量或产量优势主要来自两方面:一方面是地上部相互作用,由于间作体系中作物存在生态

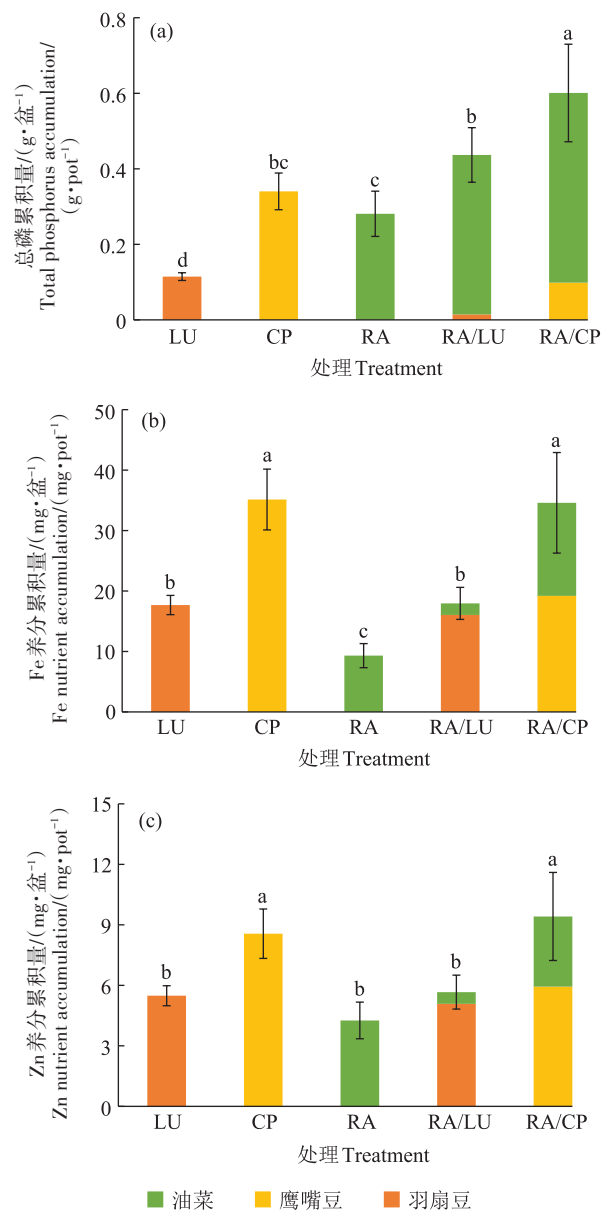


图4 不同种植方式下作物地上部P、Fe、Zn元素的累积量
Figure 4 Accumulation of P, Fe, Zn in above-ground biomass for different treatments

位分离现象,因此可以通过空间补偿效应来提高对光、热资源的截获和利用率^[21]。油菜植株的茎直立,地上部植株相比于豆科作物高大舒展,边际效应的增强使其能充分接收光温资源,提高了光合作用强度,为油菜的干物质积累提供了有利条件。另一方面是地下部相互作用,根系发育的时间和空间互补效应以及根系分泌物的相互作用可通过提高水分和养分的吸收能力来促进作物的生长^[16,22-23]。首先是间作对根系形态的影响,周泉等^[21]研究得到油菜与紫云英间作提高了油菜根系总根长、总根表面积、总根体积和平

均根系直径等根系形态,根系结构的增强增加了养分的吸收。在本试验过程中,我们也发现间作后的油菜根系结构更茂密,茎秆粗度明显提升,从而有助于养分的吸收。兰玉峰等^[13]报道鹰嘴豆/玉米间作可以显著促进玉米对P的吸收,地上部吸P量提升约42%。本研究得出鹰嘴豆/油菜间作后油菜植株对P的吸收量可增加78%。间作还可以促进根系有机酸分泌,使根际土壤环境明显酸化,进而提高土壤P、Fe等元素的有效性^[8,16]。本研究中,鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作后,豆科作物鹰嘴豆和羽扇豆植株的P、Fe、Zn养分含量都有所增加(表2,图4),且其根际有机酸分泌强度也明显增加,理论上这些现象会促进豆科作物自身产量的增加,但试验结果却表现出豆科作物的单株质量下降(表1),这可能是由于移栽的油菜生长快,很快形成较大株体,对光热资源的竞争有绝对优势,从而导致豆科作物光热资源不充分,造成产量下降。

油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作后,作物根际土壤P、Fe、Zn养分的有效性比单作作物增强,主要原因是由于植物根际有机酸的分泌量增加^[8-9,24-26]。有机酸活化P、Fe、Zn等元素的机理包括络合溶解作用,有机酸、有机阴离子与Fe、Al和Ca等金属的络合反应,有机酸与磷酸根竞争络合位点机制,以及酸溶解作用,这些作用都能提高P、Fe、Zn等养分的有效性^[8]。Brady等^[27]研究指出P在土壤pH为6~7时有效性最高,pH太高或太低都会一定程度上限制P的有效性;Fe元素在土壤pH<6时,元素有效性明显增加;而Zn元素在酸性土壤中活性都较高,且活性随着酸性的增加而增加。本研究中,油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作对根际土有机酸分泌具有明显促进作用,且提高了微量元素有效性^[28]。还原活化作用也是提高P、Fe等元素有效性的重要机制之一。根际有机酸分泌增强造成根际微生物活性高于非根际,使得根际土还原电位降低,进而使Fe等变价金属还原,从而提高Fe养分有效性^[8]。土壤P在被低分子量有机酸活化的同时也伴有大量Fe、Al等元素的释放,其释放规律与P活化存在一定相互关系^[29]。相反,土壤P的有效含量水平也会影响微量元素Fe、Zn的有效性,例如在高P环境下,P会提高土壤中铁铝氧化物和水化物等对Zn的吸附能力,干扰Zn的吸收利用,降低土壤Zn元素的有效性^[30];Salviaggiotti等^[31]的研究表明高肥力或高氮肥投入条件下,豆科作物的生物固氮潜力被显著抑制。因此,在油菜与豆科作物间作系统中,需要配套相应的化肥减施技术,避免出现养分阻遏现象,以有效提高

土壤养分利用率,实现减肥与养分利用率提升的双赢局面。此外,不同有机酸在不同环境中对不同养分的活化强度也有差异。本研究中油菜与鹰嘴豆、羽扇豆间作后,植株根际土甲酸含量都有不同程度增加(图2),相关性分析也得出甲酸含量与P、Fe、Zn有效态含量均表现出正相关(图3),说明甲酸对土壤P、Fe、Zn养分的活化能力高于其他有机酸。王永壮等^[28]进一步得出在石灰性和中性土壤中草酸对无机P的活化效果最好,而在酸性土壤中柠檬酸对P的活化效果最好。而陆文龙等^[8]指出有机酸中以草酸、柠檬酸降低土壤P吸附(即提高P活性)的能力效果最强,酒石酸效果最弱。

4 结论

间作种植后,油菜与鹰嘴豆间作下的地上部生物量和P、Fe、Zn养分吸收总量都达到最高水平,分别为228.9 g、0.60 g、34.60 mg和9.41 mg;与作物单作相比,系统P、Fe、Zn的吸收量增加幅度分别为114%、270%和121%。鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作下植株的养分含量均有明显增加,作物根系有机酸分泌量也高于单作,说明鹰嘴豆、羽扇豆与油菜间作相互促进了根际有机酸含量的增加以及植株对P、Fe、Zn养分的吸收。

参考文献:

- [1] LAMBERS H. Phosphorus acquisition and utilization in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73: 17-42.
- [2] SZEREMENT J, SZATANIK-KLOC A, MOKRZYCKI J, et al. Agromomic biofortification with Se, Zn, and Fe: an effective strategy to enhance crop nutritional quality and stress defense: a review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(1): 1129-1159.
- [3] 张进, 吴良欢, 王敏艳. 铁氮配施对稻米中铁、锌、钙、镁和蛋白质含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 122-125. ZHANG J, WU L H, WANG M Y. Effect of iron and nitrogen mixed fertilizers on the content of Fe, Zn, Ca, Mg and protein in brown rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 122-125.
- [4] SHEN R P, SUN B, ZHAO Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 347-355.
- [5] MACDONALD G K, BENNETT E M, POTTER P A, et al. Agromomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [6] ZHANG C, TIAN H, LIU J, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1020.
- [7] WEI X, SHAO M, ZHUANG J, et al. Soil iron fractionation and availability at selected landscape positions in a loessial gully region of northwestern China[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(4):

- 617-626.
- [8] 陆文龙,曹一平,张福锁.根分泌的有机酸对土壤磷和微量元素的活化作用[J].应用生态学报,1999,10(3):379-382. LU W L, CAO Y P, ZHANG F S. Role of root-exuded organic acids in mobilization of soil phosphorus and micronutrients[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3): 379-382.
- [9] 吕阳.水旱轮作体系的磷平衡与土壤磷有效化过程研究[D].北京: 中国农业大学, 2016. LÜ Y. Phosphorus balance in paddy-upland rotation system and processes of increasing soil phosphorus availability [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [10] SHANE M W, LAMBERS H. Cluster roots: a curiosity in context[J]. *Plant and Soil*, 2006, 274(1): 101-125.
- [11] ZHANG H W, HUANG Y, YE X S, et al. Genotypic differences in phosphorus acquisition and the rhizosphere properties of *Brassica napus* in response to low phosphorus stress[J]. *Plant & Soil*, 2009, 320 (1/2): 91-102.
- [12] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J].植物生态学报,2014,38(3):298-310. WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3): 298-310.
- [13] 兰玉峰,夏海勇,刘红亮,等.施磷对西北沿黄灌耕灰钙土玉米/鹰嘴豆间作产量及种间相互作用的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(5):917-922. LAN Y F, XIA H Y, LIU H L, et al. Yield and inter-specific interactions in maize/chickpea intercrop under different application rates of P in irrigated sierozem along the Yellow River in northwest China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 917-922.
- [14] 李隆.间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J].中国生态农业学报,2016,24(4):403-415. LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403-415.
- [15] LI S M, LI L, ZHANG F S, et al. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping[J]. *Annals of Botany*, 2004, 94(2): 297-303.
- [16] 王亚君,王腾琦,侯志洁,等.根系分泌物对紫云英油菜间作的响应[J].应用生态学报,2021,32(5):1783-1790. WANG Y J, WANG T Q, HOU Z J, et al. Responses of root exudates to intercropping of Chinese milk vetch with rape[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1783-1790.
- [17] PEARSE S J, VENEKLAAS E J, CAWTHRAY G, et al. Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species' ability to use phosphorus from aluminium, iron or calcium phosphate sources[J]. *New Phytologist*, 2007, 173(1): 181-190.
- [18] 李煜姗,杨再强,李平,等.高效液相色谱法测定设施番茄土壤低分子量有机酸的色谱条件研究[J].土壤通报,2016,47(1):73-78. LI Y S, YANG Z Q, LI P, et al. Study on chromatographic condition in determination of low molecular weight organic acids in tomato-planted soil under greenhouse with HPLC[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 73-78.
- [19] WEI T, SIMKO V. R package 'corrplot': visualization of a correlation matrix. (Version 0.92)[EB/OL]. [2022-11-20]. <https://github.com/taiyun/corrplot>. 2021.
- [20] 肖靖秀,汤利,郑毅.氮肥用量对油菜/蚕豆间作系统作物产量及养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1468-1473. XIAO J X, TANG L, ZHENG Y. Effects of N fertilization on yield and nutrient absorption in rape and faba bean intercropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1468-1473.
- [21] 周泉,王龙昌,马淑敏,等.西南旱地油菜间作紫云英和秸秆覆盖的生产效应[J].作物学报,2018,44(3):431-441. ZHOU Q, WANG L C, MA S M, et al. Influences of rape intercropping with Chinese milk vetch and straw mulching on productive benefits in dryland of southwest China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 431-441.
- [22] 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*, 2007, 104 (27): 11192-11196.
- [23] 肖靖秀,郑毅,汤利,等.间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化[J].土壤学报,2016,53(3):685-693. XIAO J X, ZHENG Y, TANG L, et al. Changes in organic and phenolic acids in rhizosphere of interplanted wheat and faba bean with growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 685-693.
- [24] HOULTON B Z, WANG Y P, VITOUSEK P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 327-330.
- [25] LI L, TILMAN D, LAMBERS H, et al. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture[J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63-69.
- [26] SHEN J B, LI C J, MI G H, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64 (5): 1181-1192.
- [27] BRADY N C, WEIL R R. The nature and properties of soils[M]. Macmillan Company, 1960.
- [28] 王永壮,陈欣,史奕,等.低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J].生态学报,2018,37(7):2189-2198. WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2189-2198.
- [29] CLARHOLM M, SKYLLBERG U, ROSLING A. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter-the unbutton model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 168-176.
- [30] 黄德明,徐秋明,李亚星,等.土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5):966-970. HUANG D M, XU Q M, LI Y X, et al. Influence of soil N and P excess on the availability of Zn, Mn, Fe, Cu and their content in plant[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 966-970.
- [31] SALVAGIOTTI F, CASSMAN K G, SPECHT J E, et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 1-13.