

# 玉米和马铃薯根系分泌物对马铃薯生长的影响

字淑慧,吴开贤,欧阳钺人,范志伟,杨友琼,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:**通过溶液培养法获取供体玉米和马铃薯根系分泌物,用来浇灌盆栽受体马铃薯“会-2号”,设单株马铃薯浇玉米根系分泌物(P+M-RE)、单株马铃薯浇马铃薯根系分泌物(P+P-RE)和单株马铃薯浇自来水(CK)3个处理,研究玉米、马铃薯根系分泌物对盆栽马铃薯生长的影响。结果表明:(1)盛花期和成熟期,P+M-RE处理的块茎生物量比P+P-RE增加了42.4%和28.5%,比CK增加了28.8%和8.2%,P+P-RE比CK减少了23.7%和28.4%,差异分别为显著和极显著;(2)分枝期、盛花期和成熟期与CK相比,P+M-RE处理地上和地下部分生物量分别提高了8.3%~12.7%和7.5%~45.6%,P+P-RE处理分别降低了1.7%~12.9%和5.5%~20.9%;两处理的茎叶比均比CK低,根冠比在盛花期和成熟期比CK提高了64.1%、42.5%和56.8%、40.0%;(3)观测期内,P+M-RE处理叶片、茎秆、根系和块茎的化感敏感指数 $RI>0$ ,表现为促进作用,敏感程度为根系>叶>块茎>茎秆;P+P-RE处理根系 $RI<0$ ,叶片、块茎在分枝期和盛花期 $RI>0$ ,成熟期为 $RI<0$ ,整体表现为抑制作用;(4)盛花期马铃薯干物质转移率(DMME)及贡献率(DMCR)P+M-RE处理比CK分别提高了45.6%和48.0%,P+P-RE处理比CK分别提高了30.7%和43.9%。由此说明,玉米根系分泌物对马铃薯地上茎叶和地下根系及块茎生长具有净促进作用,有利于块茎的膨大,而马铃薯根系分泌物对自身地上和地下生长则具有抑制作用,影响了块茎膨大,这为揭示玉米||马铃薯体系增产机制提供了一定的理论依据。

**关键词:**根系分泌物;玉米;马铃薯;化感效应;盆栽试验

**中图分类号:**S532 **文献标志码:**A

## Effects of root exudates of maize and potato on potato growth

ZI Shu-hui, WU Kai-xian, OUYANG Cheng-ren, FAN Zhi-wei, YANG You-qiong, ZHOU Feng, WU Bo-zhi  
(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

**Abstract:** In this experiment, root exudates of donor maize and potato obtained by solution culture method were applied on potato plants in pot. Three treatments including potato applied with maize root exudates (P+M-RE), potato applied with potato root exudates (P+P-RE), and potato applied with water (CK) were carried out to evaluate potato growth. The results showed that: (1) The tuber biomass of potato treated with P+M-RE increased by 42.4% and 28.5%, 28.8% and 8.2% than that treated with P+P-RE and CK at the flowering and mature stages, respectively, while the tuber biomass of potato treated with P+P-RE reduced by 23.7% and 28.4% compared to that of CK at two stages, respectively. The difference was significant or extremely significant. (2) At the branching, flowering and mature stages, biomass of aboveground and underground with P+M-RE increased by 8.3%~12.7% and 7.5%~45.6%, while those in P+P-RE decreased by 1.7%~12.9% and 5.5%~20.9% compared to that of CK; the stem and leaf ratio in both two treatments were lower than that in CK, while the root and crown ratio increased by 64.1% and 42.5%, 56.8% and 40% than that in CK in the flowering and mature stages, respectively. (3) During the observation stage, the response index ( $RI$ ) $>0$  in leaf, stem, root, and tuber of potato treated with P+M-RE, and the sensitivity ranked as root>leaf>tuber>stem, showing a promotion action; P+P-RE treated potato root had  $RI<0$ , while P+P-RE

收稿日期:2018-04-11

修回日期:2019-02-16

基金项目:国家自然科学基金项目(31360306);公益性行业(农业)科研专项-西南坡耕地合理耕层构建技术集成示范(201503119-03-03);云南省玉米产业体系(2017KJTX002)

作者简介:字淑慧(1971-),女,云南大理人,副教授,硕士生导师,主要从事旱地作物栽培与耕作及生理生态研究。E-mail: zsh7525@163.com

通信作者:吴伯志(1960-),男,云南玉溪人,教授,博导,主要从事山地农业可持续发展与利用研究。E-mail: Bozhiwu@hotmail.com

treated leaf and tuber had  $RI>0$  at the branching and flowering stages, and  $RI<0$  at mature stage, which showed a inhibition action. (4) At the flowering stage, dry matter mobilization efficiency (DMME) and contribution rate (DMCR) increased by 45.6% and 48.0% with P+M-RE, and increased by 30.7% and 43.9% with P+P-RE compared to that with CK. It is suggested that the root exudates of maize roots can promote the growth of the potato shoots, roots, and tubers, which are beneficial to the tuber expansion, while the root exudates of potato had an inhibitory effect on aboveground and underground growth that affects tuber expansion. Our results provide a theoretical basis for revealing the yield increasing mechanism in maize and potato intercropping system.

**Keywords:** root secretion; corn; potato; allelopathic effect; pot experiments

根系分泌物(Root exudates)是指健康完整的活体植物根系向周围土壤释放的化学物质总称<sup>[1]</sup>,是特定环境下植物根系生命活动与周围植物及土壤生态环境之间的化学媒介<sup>[2]</sup>。研究表明,根系分泌物是“植物-植物”间根际交流的“语言”和“效应器”<sup>[3]</sup>,植物通过根系分泌物携带的特定信息,高度传达着邻近植物的特定身份<sup>[4]</sup>,并引起整个根际微环境产生不同的反应<sup>[5]</sup>,进而对邻近植物产生促进或抑制的化感作用<sup>[6-7]</sup>。

化感作用是植物通过地上枝叶和根际释放的化学物质,直接或间接改变周围生命体的微环境,进而影响自身及其邻近植物生长发育的现象<sup>[8-9]</sup>。植物根系分泌物对邻近植物产生的促进化感作用<sup>[10]</sup>,是间、套、混作提高产量的基础<sup>[11]</sup>,在农业生产中起着重要的作用<sup>[12-13]</sup>。例如,在玉米与大豆间作中,玉米根系分泌物能促进大豆根瘤的形成而促进玉米的生长发育,提高玉米产量<sup>[14]</sup>;而与花生间作时,玉米根系分泌物有利于改善花生对铁的吸收,进而增加花生的产量<sup>[15-16]</sup>。在马铃薯种植过程中,与连作5 a的马铃薯相比,轮作减少了马铃薯根系分泌物的酸类物质种类及其含量<sup>[17]</sup>。这些研究说明,在农作物种植中,同一作物能根据邻近作物的身份,分泌不同的物质,形成不同的微环境,改变种间、种内作物的生长发育,进而影响作物的产量和品质。

玉米、马铃薯是我国主要的粮食作物,两作物间、套作是重要的旱地非豆科种植模式,在我国及世界农业生产中多有应用,尤其在中国西南地区占有重要的位置<sup>[18-19]</sup>。随着我国马铃薯主粮化战略实施及粮食安全的推进,两作物间作在保障粮食安全及推进马铃薯主粮化进程中占有举足轻重的地位,许多学者就两种作物间作提高单位面积产量及减少病虫害危害等方面进行了大量研究,结果表明,间作不仅提高了单位面积的产量<sup>[20]</sup>,还减轻了马铃薯连作引起的病、虫、草害<sup>[21-22]</sup>。但有关两作物间作中根系分泌物对作物生长的影响研究较少。因此,为进一步摸清玉米马铃薯间作优势的机理,

本研究以马铃薯为受体,以活体玉米、马铃薯为供体,通过溶液培养技术收集供体根系分泌物,用盆栽试验研究供体玉米和马铃薯的根系分泌物对受体马铃薯生长的影响,以期为进一步阐明两作物间作优势的机制提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于云南农业大学果树认知中心大棚内(25.13°N, 102.75°E),海拔为1 987 m,年平均温度14.7℃;年降水量960 mm,主要集中在5~9月;年蒸发量2 384 mm,年日照时数为2 617.4 h,无霜期301 d。

### 1.2 供试品种

供体马铃薯和受体马铃薯均选用“会-2号”,该品种为云南大面积间套作的耐阴型马铃薯。玉米选用“云瑞88”,该品种在云南广泛种植。

### 1.3 试验设计

试验采用单因素设计,以马铃薯植株为受体,活体马铃薯和玉米植株为供体,通过溶液培养法获取供体根系分泌物,设马铃薯单株浇玉米根系分泌物(P+M-RE)、马铃薯单株浇马铃薯根系分泌物(P+P-RE)和马铃薯单株浇自来水(CK)3个处理,每盆为1个处理,每个处理重复60次,共180盆,分枝期、盛花期和成熟期每个处理各取20盆进行观测;3个处理在大棚中随机摆放,每隔15 d彼此调换位置,保证处理间不受大棚摆放位置的影响。

供体马铃薯植株采用育苗移栽方法。2015年4月20日选取大小为120~150 g的完好马铃薯块茎,用1.25%次氯酸钠浸泡5 min消毒,用蒸馏水冲洗,稍干后在沙壤基质中育苗20 d,5月10日选取大小均匀、鲜重为7~8 g、株高为12~13 cm、根长为17~18 cm幼苗进行移栽,每盆种植1株。供试基质为云南山地红壤自然风干土、蛭石、草炭、育苗有机肥,按体积比5:2:2:1混合而成。风干土混合前用10 mm网筛去除石块和残渣等杂物,并用多菌灵

消毒后与其它 3 种基质按比例混合,装入黑色塑料盆中(花盆上口径 37 cm,下口径 28 cm,高 32 cm),每盆装 10 kg。风干土壤主要营养成分为:全氮 1.4 g·kg<sup>-1</sup>,氨态氮 4.34 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮 5.38 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷 3.21 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷 17.0 mg·kg<sup>-1</sup>,全钾 4.47 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾 113.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质 24.14 g·kg<sup>-1</sup>,pH 值 5.7。底肥施尿素(N ≥46.4%),马铃薯施用量为 2.8 g·株<sup>-1</sup>、玉米施用量为 3.2 g·株<sup>-1</sup>,两作物施硫酸钾(K<sub>2</sub>O ≥50%)为 12.1 g·株<sup>-1</sup>,施过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≥16.0%)为 2.5 g·株<sup>-1</sup>;施用时将 3 种肥料混合后与准备好的基质充分混匀。为保证受体马铃薯生育期内的营养,移栽后 20 d,每 5 d 浇 1 次霍格兰营养液至成熟期,追肥第 1 次为 6 月 1 日(尿素 5.8 g·株<sup>-1</sup>,硫酸钾 12.1 g·株<sup>-1</sup>,过磷酸钙 12.5 g·株<sup>-1</sup>)、第 2 次为 6 月 20 日(尿素 12.0 g·株<sup>-1</sup>,其他同前)、第 3 次为 7 月 20 日(方法同第 2 次)。各处理除草、病虫害防治等管理措施均保持一致。

#### 1.4 根系分泌物制备及浇灌方式

供体玉米和马铃薯根系分泌物制备采用溶液培养法。供体培育:马铃薯采用沙壤基质进行育苗至 2 叶 1 心,玉米采用瓷盘育苗至 2 叶 1 心,于 2015 年 4 月 1 日移栽入水培装置中,用霍格兰营养液气喷法(每 5 min 喷雾 1 次)和叶面喷施法(每天早、晚各 1 次)培养成健壮植株,培养期间,每 5 d 更换 1 次营养液,并用消毒水对装置进行清洗,保证植株生长的营养和无菌状态。根系分泌物制备:4 月 20 日开始,每 5 d 结合清洗装置和更换营养液收集根系分泌物,收集时,将 2 000 ml 去离子水倒入清洗好的装置中,气喷法(每 5 min 喷雾 1 次)进行 8 h 后,收集溶液于塑料瓶中,带回实验室进行过滤,贮存于 4℃冰箱中,备用。

浇灌受体马铃薯植株的方式:植株移栽后 10 d (2015 年 5 月 20 日)开始,每 7 d 量取储备原液进行根际浇灌 1 次,共浇 10 次(至 2015 年 8 月 12 日),浇灌量根据受体植株生长从少到多进行,具体为 500 ml·盆<sup>-1</sup>、500 ml·盆<sup>-1</sup>、800 ml·盆<sup>-1</sup>、800 ml·盆<sup>-1</sup>、1 000 ml·盆<sup>-1</sup>、1 000 ml·盆<sup>-1</sup>、1 500 ml·盆<sup>-1</sup>、1 500 ml·盆<sup>-1</sup>、2 000 ml·盆<sup>-1</sup>、2 000 ml·盆<sup>-1</sup>,CK 用等量自来水浇灌。在 7 d 之中,根据墒情补浇自来水,保证植株正常生长,同时保证浇灌液和补充的水分不流出盆底。

#### 1.5 测定指标及方法

1.5.1 数据采集 分别于分枝期、盛花期和成熟期 3 个时期,分地上部和地下部生长性状、生物量及产

量指标进行观测。观测时,每个处理均随机取 20 盆(共 20 株),从齐土面剪断植株,先用钢卷尺测定自然高度,再带回实验室,按每株茎、叶、根、块茎分别称其鲜重,装入有编号的资料袋中,105℃杀青 30 min 后,70℃下烘至恒重,称重测量各部分的生物量。

1.5.2 根系分泌物化感效应评估 化感效应评估:采用化感效应敏感指数(Allelopathic response index, *RI*)指标<sup>[23]</sup>,对供体根系分泌物产生的化感效应进行评价。即:当  $T \geq C$  时,  $RI = 1 - C/T$ ; 当  $T < C$  时,  $RI = T/C - 1$ 。其中,  $C$  为对照值,  $T$  为处理值。当  $RI > 0$  时,表现为促进作用;当  $RI < 0$  时,表现为抑制作用;绝对值的大小与化感效应强度一致。

马铃薯干物质转化率(*DMME*)和贡献率(*DMCR*)的评估:以块茎干物质积累为基础,采用马铃薯盛花期的营养干物质转移率和贡献率指标进行评价,进一步说明根系分泌物对马铃薯块茎形成的影响。马铃薯干物质积累首先是光合作用合成的有机物按同化物运输的原则输送到块茎,其次通过植株营养器官有机物再分配和再利用的原则转运至块茎。干物质积累量越多,说明根系分泌物对马铃薯产量形成越有利。假设马铃薯营养器官干物质没有损失的情况下,营养器官干物质转移率及贡献率为<sup>[24]</sup>:营养器官干物质转移率(*DMME*) = (盛花期干物重 - 成熟期干物重) / 盛花期干物重 × 100%;营养器官干物质贡献率(*DMCR*) = (盛花期干物重 - 成熟期干物重) / 成熟期块茎干物重 × 100%。

#### 1.6 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行录入、汇总、整理与绘图,分析采用 SPSS 17.0 软件对所有指标进行多重比较(Duncan<sup>a</sup>法),显著水平均为  $P < 0.05$ ,极显著水平均为  $P < 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同根系分泌物对马铃薯块茎形成的影响

在分枝期、盛花期和成熟期 3 个时期内,供体玉米根系分泌物(M-RE)和马铃薯根系分泌物(P-RE)对受体马铃薯(P)块茎形成的影响不同,整体表现为 M-RE 对块茎形成具有促进作用, P-RE 则表现为抑制作用(表 1)。分枝期为营养生长期,供体 M-RE 和 P-RE 对受体马铃薯块茎的形成影响较小,与 CK 相比, P+M-RE 处理增加了 9.1%, P+P-RE 减少了 4.2%,处理间差异不显著;盛花期为块茎形成期,供体 M-RE 促进了受体 P 的块茎形成,使 P+M-RE 块茎生物量分别比 P+P-RE、CK 处理增加了 42.4% 和 28.8%, P+P-RE 比 CK 减少了

23.7%,处理间差异为极显著;成熟期为块茎膨大期,P+M-RE 块茎生物量比 P+P-RE、CK 增加了 28.5%和 8.2%,P+P-RE 比 CK 减少了 28.4%,处理间差异为显著(见表 1);在马铃薯的整个生育期内,2 种供体的根系分泌物对受体块茎个数影响较小,而对马铃薯块茎大小影响较大。说明 2 种根系分泌物对马铃薯块茎生长的影响主要在块茎增大期至淀粉积累期,玉米根系分泌物显著促进了块茎生物量的增加,而马铃薯根系分泌物则显著降低了块茎的生物量。

## 2.2 不同根系分泌物对马铃薯地上和地下生物量分配的影响

供体玉米和马铃薯的根系分泌物对受体马铃薯(P)生物量形成及分配的影响差异较大,前者促

进了受体 P 地上、地下部生物量的形成,后者则减少了受体 P 地上部生物量的形成,2 种供体均增加了受体 P 的根冠比和减少了茎叶比(图 1)。分枝期、盛花期和成熟期,与 CK 相比,P+M-RE 处理地上部生物量分别提高了 8.3%、8.7%、12.7%,P+P-RE 处理分别降低了 1.7%、9.2%、12.9%(图 1a);P+M-RE 处理地下部生物量分别提高了 12.3%、45.6%、7.5%,而 P+P-RE 处理分枝期和成熟期分别降低了 5.5%和 20.9%,盛花期提高了 30.7%,处理间差异达显著水平(图 1c)。3 个观测时期内 P+M-RE 和 P+P-RE 两个处理茎叶比比 CK 低,特别是成熟期分别降低了 17.1%和 10.8%,处理间差异为显著(图 1b);P+M-RE 和 P+P-RE 处理根冠比较 CK 降低了 21.2%和 5.3%,盛花期和成熟期分别提高了 64.1%、

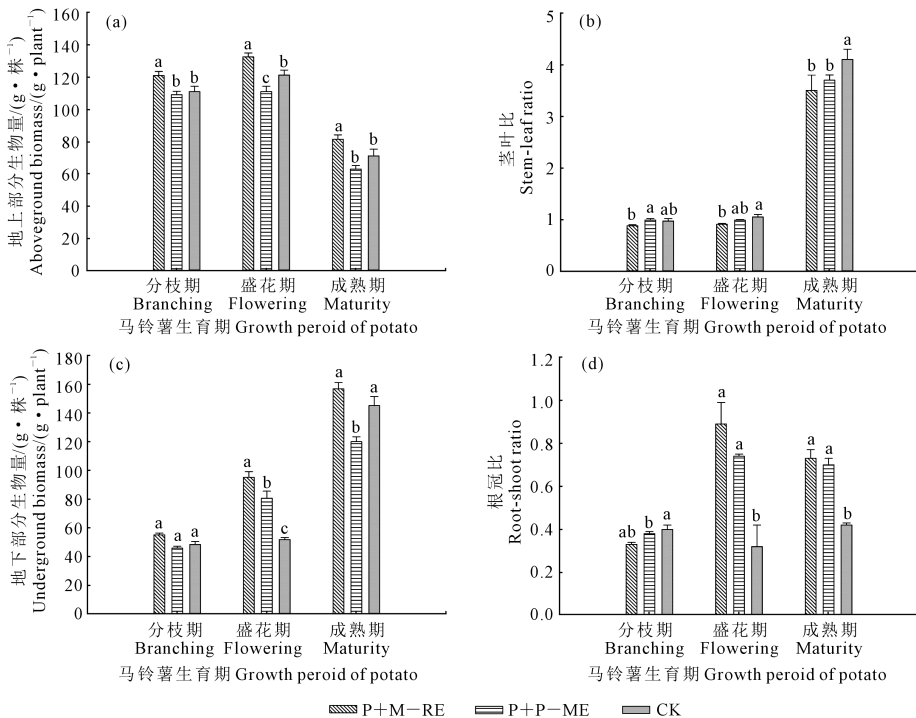
表 1 不同根系分泌物对马铃薯块茎生物量和块茎个数的影响

Table 1 The biomass and number of tubers under different root exudates

处理 Treatment	分枝期 Branching			盛花期 Flowering			成熟期 Maturity		
	块茎生物量 /(g·株 <sup>-1</sup> ) Biomass of tubers /(g·plant <sup>-1</sup> )	比 CK 增减/% Increase or decrease than CK	块茎个数 Number of tubers	块茎生物量 /(g·株 <sup>-1</sup> ) Biomass of tubers /(g·plant <sup>-1</sup> )	比 CK 增减/% Increase or decrease than CK	块茎个数 Number of tubers	块茎生物量 /(g·株 <sup>-1</sup> ) Biomass of tubers /(g·plant <sup>-1</sup> )	比 CK 增减/% Increase or decrease than CK	块茎个数 Number of tubers
	P+M-RE	5.5±0.2	9.1	1.4±0.2	52.8±1.7A	28.8	4.8±0.5A	105.9±4.7a	8.2
P+P-RE	4.8±0.1	-4.2	0.6±0.1	30.4±1.2B	-23.7	2.4±0.3B	75.7±3.7b	-28.4	5.7±1.5
CK	5.0±0.2	-	0.6±0.1	37.6±1.4B	-	2.9±0.4B	97.2±7.4a	-	5.7±0.3

注:表中数据为平均值±标准误,同列数据中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示处理间差异极显著( $P<0.01$ )。下同。

Note: The data are means of three replicates ± standard error, values in the same column followed by different capital and lowercase letters are significant differences at 0.01 and 0.05 levels in Duncan test. The same below.



注:相同生育期内,不同小写字母表示处理间差异显著。

Note: During the same growth period, the different lowercase letters indicate significant difference between treatments.

图 1 不同根系分泌物对马铃薯地上、地下部生物量大小的影响

Fig.1 Comparison of aboveground and underground biomass of potatoes treated with different root exudates

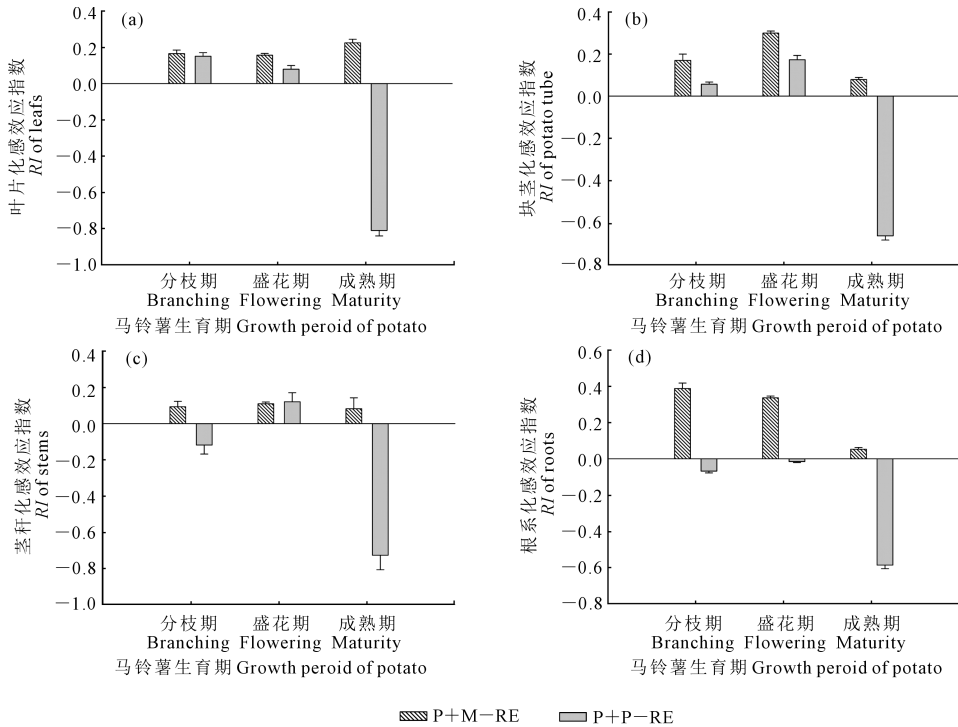


图 2 不同生育期马铃薯化感效应比较

Fig.2 Comparison of allelopathic effects of potato at different growth periods

42.5%和56.8%、40.1%，处理间差异为极显著（图1d）。由此说明，玉米根系分泌物不仅促进了马铃薯地上、地下部生物量的形成，也增加了地下部生物量的分配，促进了地下块茎的形成和膨大；而马铃薯根系分泌物则抑制了地上、地下部生物量的形成，减少了地下部生物量的分配，影响了块茎的膨大。

### 2.3 不同根系分泌物对马铃薯的化感效应

将供体玉米根系分泌物(M-RE)和马铃薯根系分泌物(P-RE)对受体马铃薯(P)在分枝期、盛花期和成熟期3个时期产生的化感敏感指数(RI)进行分析,发现M-RE对马铃薯地上、地下部生长均表现为促进作用( $RI > 0$ ),而P-RE对地下部根系生长的抑制作用( $RI < 0$ )大于其他部位(图2)。其中,P+M-RE处理的叶片、茎秆、根系和块茎的 $RI > 0$ ,化感敏感程度根系最强,茎秆最弱,敏感程度依次为根系>叶>块茎>茎秆;P+P-RE处理除分枝期、盛花期的叶片和块茎 $RI > 0$ 外,其余时期内4个观测指标均表现为 $RI < 0$ ,特别是根系,整个生育期均表现为 $RI < 0$ (图2)。进一步说明,玉米根系分泌物对马铃薯地上、地下部生长均具有促进作用,对根系的促进作用更明显,而马铃薯根系分泌物主要抑制了地下根系和块茎膨大。

### 2.4 不同根系分泌物对马铃薯干物质转移率和贡献率的影响

与CK相比,浇玉米根系分泌物(M-RE)和马

铃薯根系分泌物(P-RE)均提高了盛花期马铃薯干物质转移率(DMME)及贡献率(DMCR)的比例,且M-RE提高了马铃薯干物质的DMME(表2)。其中,P+M-RE和P+P-RE处理的DMME分别比CK提高了45.6%和30.7%,DMCR比CK提高了48%和43.9%,处理间差异为显著和极显著。说明,2种供体根系分泌物均能提高马铃薯干物质转移率和贡献率,且玉米根系分泌物的作用更明显。

## 3 讨论与结论

本试验通过利用供体玉米和马铃薯根系分泌物浇灌受体马铃薯,发现玉米根系分泌物对马铃薯的地上茎叶和地下根系及块茎的生长及膨大具有净促进作用,而马铃薯根系分泌物则表现为抑制作用(表1,图1、图2),这为进一步阐明玉米马铃薯间作的生物学机理提供了一定的理论参考,也为研究其他间套作的化感效应提供了借鉴依据。

研究发现,农业生产中,作物与作物之间的化感效应在种间一般表现为促进作用,在种内表现为抑制或自毒作用<sup>[5,9,24-27]</sup>,因此,为提高单位面积的总产量及减少病虫害,种植业中常采用间套混作及轮作。本试验中,用玉米根系分泌物浇马铃薯,促进了马铃薯的生长和块茎形成,这一结果与郭彩萍等人<sup>[28]</sup>利用玉米马铃薯地上部分茎叶浸泡液浇灌玉米,发现促进玉米生长及提高产量性状的结果相似,

表 2 不同根系分泌物对马铃薯盛花期 *DMME* 和 *DMCR* 的影响

Table 2 *DMME* and *DMCR* of potato at flowering period under different intercropping treatments

处理 Treatment	干物质转 移率/% <i>DMME</i>	比 CK 增减/% Increase or decrease than CK	干物质 贡献率/% <i>DMCR</i>	比 CK 增减/% Increase or decrease than CK
P+M-RE	36.0±2.2aA	45.6	73.6±4.2A	48.0
P+P-RE	28.3±2.1bAB	30.7	68.1±3.6A	43.9
CK	19.6±2.4cB	-	38.2±3.1B	-
<i>F</i>	11.678 **	-	13.491 **	-
<i>P</i>	0.000	-	0.000	-

也与董淑琦等人<sup>[29]</sup>用谷子茎秆、叶片的浸提液浇玉米幼苗,对玉米幼苗的生长具有促进生长的研究结果类似;而用马铃薯根系分泌物浇马铃薯则对地下根系和块茎膨大产生了抑制作用,这一结果与万年鑫等人<sup>[30]</sup>利用马铃薯根、茎、叶不同部位浸提液浇马铃薯具有自毒效应及对根系生长产生了抑制作用的结论一致。

本试验为了更好地说明供体根系分泌物的化感效应,采用单株盆栽种植,以避免密度或种内竞争产生效应的影响;同时用无离子水通过溶液培养法收集根系分泌物原液直接进行浇灌,并随着植物生长而增加浇灌量,以增加受体对根系分泌物的吸收量,使试验更能说明供体与受体之间的化感程度。结果表明,供体玉米根系分泌对受体马铃薯的影响,无论对地上部分的茎叶生长,还是对地下部分的根系及块茎生长,化感效应指数  $RI > 0$ , 均为显著的促进作用(表 2 和图 2),特别是对地下根系和块茎的形成尤为突出(图 1);而供体马铃薯根系分泌物对同种马铃薯的影响较为复杂,除对根系生长始终具有抑制作用外,对块茎和叶片的影响,盛花期前表现为促进作用,成熟期表现为抑制作用,对茎秆基本表现为抑制作用(图 1、图 2)。由此说明,玉米根系分泌物对马铃薯生长发育具有促进作用,而马铃薯根系分泌物对马铃薯地上茎叶和地下根系及块茎生长具有抑制作用,这种促进和抑制的化感效应正是玉米马铃薯间套作高产的基础之一。

综上所述,玉米根系分泌物对马铃薯地上、地下部生长均具有促进作用,对地下根系和块茎生长的促进作用更明显,而马铃薯根系分泌物则表现为抑制作用,对地下部生长的抑制作用更突出,这为揭示玉米马铃薯间作体系增产机制提供了一定的理论参考。

## 参考文献:

- [1] 孔垂华, 姜永根. 化学生态学前沿 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 357-374.
- [2] Bais H P, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. Annual Review of Plant Biology, 2006, 57(1): 233-266.
- [3] Biedrzycki M L, Jilany T A, Bais S A, et al. Root exudates mediate kin recognition in plants [J]. Communicative & Integrative Biology, 2010, 3(4): 28-35.
- [4] Crepy M A, Casal J J. Photoreceptor-mediated kin recognition in plants [J]. New Phytologist, 2015, 205(1): 329-38.
- [5] Semchenko M, Saar S, Lepik A. Plant root exudates mediate neighbor recognition and trigger complex behavioral changes [J]. New Phytologist, 2014, 204(3): 631-637.
- [6] Bais H P, Vepachedu R, Gilroy S, et al. Allelopathy and exotic plant invasion: from molecules and genes to species interactions [J]. Science, 2003, 301(5638): 1377-1380.
- [7] Van D N M, Bouwmeester H J. Metabolomics in the rhizosphere: tapping into belowground chemical communication. [J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(3): 256-265.
- [8] Latif S, Chiapusio G, Weston L A. Allelopathy and the role of allelochemicals in plant defence [M]. Advances in Botanical Research, 2017, 82: 19-54.
- [9] 孔垂华, 胡飞, 王朋. 植物化感(相生相克)作用及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 25-143.
- [10] Baetz U, Martinoia E. Root exudates: the hidden part of plant defense [J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(2): 90-98.
- [11] 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.
- [12] Faget M, Nagel K A, Walter A, et al. Root-root interactions: extending our perspective to be more inclusive of the range of theories in ecology and agriculture using in-vivo analyses [J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 253-266.
- [13] Allen J L, Tenhage L, Leflaive J. Regulation of fatty acid production and release in benthic algae: could parallel allelopathy be explained with plant defence theories [J]. Microbial Ecology, 2017, 75(3): 1-13.
- [14] Li B, Li Y Y, Wu H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and  $N_2$  fixation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(23): 6496-6501.
- [15] Shen H, Xiong H, Guo X, et al. AhDMT1, a  $Fe^{2+}$  transporter, is involved in improving iron nutrition and  $N_2$  fixation in nodules of peanut intercropped with maize in calcareous soils [J]. Planta, 2014, 239(5): 1065-1077.
- [16] Xiong H, Kakei Y, Kobayashi T, et al. Molecular evidence for phytosiderophore-induced improvement of iron nutrition of peanut intercropped with maize in calcareous soil [J]. Plant Cell & Environment, 2013, 36(10): 1888-1902.
- [17] 张文明, 邱慧珍, 张春红, 等. 连作马铃薯不同生育期根系分泌物的成分检测及其自毒效应 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 215-224.

- [18] Wu K, Fullen M A, An T, et al. Above and below-ground inter-specific interaction in intercropped maize and potato: a field study using the 'target' technique [J]. *Field Crops Research*, 2012, 139: 63-70.
- [19] Kidane B Z, Mereseit H. et al. Maize and potato intercropping: A technology to increase productivity and profitability in Tigray [J]. *Open Agriculture*, 2017, 2(1): 411-416.
- [20] 魏常慧, 刘亚军, 冶秀香, 等. 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(农业与生命科学版)*, 2017, 43(1): 54-64.
- [21] He X H, Zhu S S, Wang H N, et al. Crop diversity for ecological disease control in potato and maize [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 45-50.
- [22] 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, 5(2): 110-117.
- [23] Zhang Y K, Chen F J, Long L, et al. The role of maize root size in phosphorus uptake and productivity of maize/faba bean and maize/wheat intercropping systems [J]. *Science China Life Sciences*, 2012, 11(11): 993-1001.
- [24] 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.
- [25] Sitthinoi P, Lertmongkol S, Chanprasert W, et al. Allelopathic effects of jungle rice (*Echinochloa colona* (L.) Link) extract on seed germination and seedling growth of rice [J]. *Agriculture & Natural Resources*, 2017, 51(2): 74-78.
- [26] Li H Y, Zhou X G, Wu F Z. Effects of root exudates from potato onion on *Verticillium dahlia* [J]. *Allelopathy Journal*, 2018, 43(2): 217-222.
- [27] Balendres M A, Nichols D S, Tegg R S, et al. Potato root exudation and release of spongospore subterranean resting spore germination stimulants are affected by plant and environmental conditions [J]. *Phytopathologische Zeitschrift*, 2017, 165(1): 64-72.
- [28] 郭彩萍, 字淑慧, 欧阳铖人, 等. 玉米马铃薯地上部水浸提液对玉米生长的影响 [J]. *玉米科学*, 2016, 24(2): 79-84.
- [29] 董淑琦, 原向阳, 温银元, 等. 谷子秸秆水浸提液对玉米苗期生长的化感作用研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(8): 35-42.
- [30] 万年鑫, 袁继超, 何卫, 等. 马铃薯不同器官浸提液的自毒作用 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(4): 411-418.

(上接第 87 页)

- [30] Zucconi F, Debertoldi M. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste [C]//Debertoldi M, Ferranti M P, Hermite P L, et al. *Compost: quality and use*. Essox: Elsevier Applied Science, 1987: 30-50.
- [31] 唐景春, 孙青, 王如刚, 等. 堆肥过程中腐植酸的生成演化及应用研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(5): 73-77.
- [32] 姚武, 顾燕青, 巫阳, 等. 畜禽堆肥过程中腐殖质形成特征研究进展 [J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 13(5): 517-522.
- [33] 唐璐. 不同堆肥条件对堆肥过程中碳素损失及腐殖质形成的影响研究 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
- [34] 夏炜林, 黄宏坤, 杨尧, 等. 粪便高温堆肥及其施用效果研究综述 [J]. *四川环境*, 2007, 19(4): 102-106.
- [35] 张雪辰, 邓双, 王旭东. 快腐剂对畜禽粪便堆肥过程中腐熟度的影响 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 888-894.
- [36] 王亚飞, 李梦婵, 邱慧珍, 等. 不同畜禽粪便堆肥的微生物数量和养分含量的变化 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(3): 37-45.
- [37] 张雪辰. 畜禽粪便堆肥化过程碳氮转化规律及其受调控措施的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [38] Zmora-Nahum S, Markovitch O, Tarchitzky J, et al. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11): 2109-2116.
- [39] 李必琼. 作物秸秆与城市污泥高温好氧堆肥过程中碳氮磷及重金属转化研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [40] 吴钦泉, 谷端银, 陈士更, 等. 腐植酸类肥料活化技术的研究及其应用 [J]. *腐植酸*, 2013, 34(4): 15-17.
- [41] 李吉进. 畜禽粪便高温堆肥机理与应用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [42] 杨毓峰, 薛澄泽, 唐新保, 等. 畜禽废弃物的强制通风静态堆肥化处理及其生物学效应 [J]. *农业环境保护*, 2000, 19(4): 209-212.
- [43] Doane T A, Olivier C D, William R H. Short-term soil carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems [J]. *Geoderma*, 2003, 114(3): 319-331.
- [44] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 252-256.