

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.05.009

阳琴, 徐博, 占丰瑞, 等. 不同分子量碳源对砂姜黑土磷素有效性和玉米磷吸收的影响. 土壤, 2023, 55(5): 1001–1007.

## 不同分子量碳源对砂姜黑土磷素有效性和玉米磷吸收的影响<sup>①</sup>

阳琴<sup>1</sup>, 徐博<sup>1</sup>, 占丰瑞<sup>1</sup>, 赵华<sup>2</sup>, 李虹颖<sup>3</sup>, 熊启中<sup>1</sup>, 孙瑞波<sup>1</sup>, 李硕<sup>1</sup>, 张朝春<sup>1</sup>, 叶新新<sup>1\*</sup>

(1 安徽农业大学资源与环境学院/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心/农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室/江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室, 合肥 230036; 2 砀山县农业农村局, 安徽宿州 235300; 3 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001)

**摘要:** 为探究不同分子量碳源对土壤磷有效性的影响, 以安徽省典型砂姜黑土为供试土壤, 通过盆栽种植玉米试验, 开展了不同碳源(果糖、蔗糖、纤维素)对土壤中磷形态转化和玉米磷吸收影响的研究。结果表明: ①土壤 Olsen-P 含量随时间先增加后降低。在玉米间苗 7 d 后果糖处理 Olsen-P 含量最高, 15 d 后纤维素处理 Olsen-P 含量达最大值, 90 d 后, 相比于对照、果糖和蔗糖处理, 纤维素处理土壤 Olsen-P 含量显著增加了 79.74%、54.03% 和 30.03% ( $P < 0.05$ )。②玉米间苗 90 d 后, 相较于对照处理, 纤维素处理显著降低了 Fe-P 和 Ca<sub>10</sub>-P 含量, 增加了 Ca<sub>8</sub>-P 含量, 而对照、果糖和蔗糖处理的 Ca<sub>2</sub>-P 含量无显著差异。与对照处理相比较, 纤维素处理显著提高了活性有机磷(LOP)和中等活性有机磷(MLOP)含量, 减少了中稳定性有机磷(MROP)含量。③纤维素处理增加了土壤可溶性有机碳(DOC)含量和磷酸酶活性, 降低了土壤 pH 和交换性钙含量, 这是土壤磷有效性增加的重要原因; ④与对照、果糖和蔗糖处理相比, 纤维素处理下玉米磷吸收量显著增加了 46.20%、19.05% 和 19.28%。可见, 与低分子量碳源(果糖和蔗糖)相比较, 高分子量碳源(纤维素)提高土壤磷有效性和玉米磷吸收效果长效性更好。研究结果为指导农田生态系统中利用碳源调控土壤磷的转化和有效性提供了重要信息。

**关键词:** 碳源; 分子量; 磷有效性; 磷形态; 砂姜黑土; 玉米; 磷吸收量

**中图分类号:** S158.5      **文献标志码:** A

## Effects of Carbon Sources with Different Molecular Weights on Phosphorus Availability and Phosphorus Uptake in Maize

YANG Qin<sup>1</sup>, XU Bo<sup>1</sup>, ZHAN Fengrui<sup>1</sup>, ZHAO Hua<sup>2</sup>, LI Hongying<sup>3</sup>, XIONG Qizhong<sup>1</sup>, SUN Ruibo<sup>1</sup>, LI Shuo<sup>1</sup>, ZHANG Chaochun<sup>1</sup>, YE Xinxin<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University / Anhui Engineering Research Center for Intelligent Manufacturing and Efficient Utilization of Green Phosphate Fertilizer / Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Control of Anhui Province / Key Laboratory of Jianghuai Cultivated Land Resource Protection and Ecological Restoration, Hefei 230036, China; 2 Dangshan Agriculture and Rural Bureau, Suzhou, Anhui 235300, China; 3 Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to understand the effects of different carbon sources (fructose (GT), sucrose (ZT) and cellulose (XWS)) on the transformation of phosphorus (P) form in soil and P uptake by maize with the lime concretion (Shajiang) black soils of Anhui Province. The results showed as follows: 1) Soil Olsen-P content firstly increased and then decreased with time, after thinning for 7 days the content of Olsen-P under GT treatment reached the maximum, and after 15 days the content of Olsen-P under XWS treatment reached the maximum. After 90 days, compared with CK, GT and ZT, the content of Olsen-P under XWS treatment was significantly increased by 79.74%, 54.03% and 30.03% ( $P < 0.05$ ), respectively. 2) After 90 days, compared to CK, XWS treatments significantly reduced the contents of Fe-P and Ca<sub>10</sub>-P, and increased the contents of Ca<sub>8</sub>-P, while no significant difference was found in the contents of Ca<sub>2</sub>-P among CK, GT and ZT treatments. Compared with CK, XWS treatment

①基金项目: 安徽省教育厅重点项目(2022AH050886), 安徽省科技重大专项(202103a06020012), 安徽省自然资源科技项目(2021-K-4)和安徽省杰出青年科学基金项目(2008085J13)资助。

\* 通讯作者(yexx@ahau.edu.cn)

作者简介: 阳琴(1997—), 女, 安徽太湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤磷素高效利用研究。E-mail: yangqin1411@163.com

significantly increased the contents of active organophosphorus (LOP) and moderately active organophosphorus (MLOP), and decreased the content of moderately stable organophosphorus (MROP). 3) Under XWS treatment, soil DOC content and phosphatase activity were increased, but soil pH and exchangeable calcium content were decreased, which were important factors influencing the increase of soil P availability. 4) Compared with CK, GT and ZT treatments, P uptake of maize under XWS treatment was significantly increased by 46.20%, 19.05% and 19.28%. The results show that compared with low molecular weight carbon sources (fructose and sucrose), high molecular weight carbon sources (cellulose) have better long-term effectiveness in improving soil P availability and P absorption in maize, which provide important information for the regulation and effectiveness of soil P conversion by using carbon sources in farmland ecosystems.

**Key words:** Carbon source; Molecular weight; Phosphorus availability; Phosphorus form; Sand ginger black soil; Maize; Phosphorus uptake

磷是一种重要的矿质营养元素,在植物生长发育、生理代谢以及维持产量等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。磷在土壤中移动性差,施入土壤中的磷肥极易被固定,导致磷肥利用效率低且土壤中磷的盈余量增加<sup>[3]</sup>。有研究表明,磷肥当季利用率仅为 5%~15%<sup>[4]</sup>。因此,充分挖掘土壤中固有磷的有效性,减少磷肥投入量,对降低土壤中磷的流失至关重要。

有机碳源可为土壤中解磷微生物生长提供能量,促进磷酸酶分泌,或与土壤中磷酸根竞争吸附位点,从而促进土壤累积态磷的释放<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明,添加碳源可以影响磷转化过程和土壤磷有效性<sup>[7]</sup>。陈倩等<sup>[8]</sup>研究发现木质素能提高土壤中有效磷的含量。Zhang 等<sup>[9]</sup>研究发现果糖也可以促进有机磷的矿化过程,进而提高磷的有效性。Wu 等<sup>[10]</sup>研究结果显示,添加葡萄糖促进了缓效磷铝磷(A1-P)和铁磷(Fe-P)的活化,提高了土壤有效磷含量。而周文杰等<sup>[11]</sup>研究表明,培养 60 d 后葡萄糖和淀粉处理土壤微生物群落和功能存在显著差异。由此可以推测,不同碳源其化学结构和组成不同,被土壤微生物分解的速率和利用程度不同,对提高土壤磷有效性和促进其形态转化的效果也存在差异。目前,关于不同分子量碳源对提高土壤中磷有效性和作物磷吸收的影响缺乏系统的研究。

由此,本研究以安徽省典型砂姜黑土为供试土壤,以不同碳源作为供试材料,通过盆栽试验研究不同分子量碳源对砂姜黑土磷有效性以及玉米磷吸收的影响,以期为实现砂姜黑土“以碳调磷”,提高土壤磷素有效性提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试土壤为砂姜黑土,取自安徽农业大学皖北综合试验站。土壤的基本理化性质为: pH 7.63, 有机

质 13.47 g/kg, 有效磷 6.78 mg/kg, 速效钾 272.62 mg/kg, 碱解氮 76.73 mg/kg, 全氮 0.86 g/kg, 全磷 0.74 g/kg。土样自然风干后,研磨过 5 目筛备用。供试作物为玉米,品种为郑单 958。

### 1.2 试验设计

盆栽试验在安徽农业大学农萃园内进行,试验设置 4 个处理,分别为空白对照、果糖处理、蔗糖处理和纤维素处理,每个处理 3 个重复。试验时,取 7 kg 过 5 目筛土壤装于塑料盆,每盆的肥料供应量为:磷酸二氢钾 2.15 g, 尿素 3.5 g, 氯化钾 1.4 g。根据碳磷比(C/P)为 200 添加碳源,将土壤、碳源和肥料充分混匀,加水使其含水量达到田间持水量的 70% 后,进行播种。播种前,挑选大小均匀、无破损的玉米种子,放入 10% 过氧化氢溶液中浸泡 30 min 消毒,再用去离子水反复冲洗干净后置于纯水浸润的滤纸上,于 30℃ 培养箱内催芽,待出芽后进行播种。播种后,在玉米长至三叶期时选苗,每盆保留 1 株长势一致的幼苗。种植期间每隔 2 d 采用称重法浇水,保持土壤含水量恒定。分别在间苗 0、3、7、15、30、60、90 d 后采集土样,风干过筛后测定土壤中有效磷含量及相关指标;并在间苗 90 d 后采集地上部和地下部植株样品,将样品放入烘箱 105℃ 杀青 30 min, 65℃ 下烘干至恒重,称量植株干重,后粉碎测定其磷含量。

### 1.3 测定指标与方法

土壤 pH 的测定采用电位法(土水质量比 1 : 2.5)<sup>[12]</sup>; Olsen-P 含量测定<sup>[13]</sup>采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法;无机磷的测定采用顾益初和蒋柏藩<sup>[14]</sup>的分级方法,包括 NaHCO<sub>3</sub> 溶性磷(Ca<sub>2</sub>-P)、NH<sub>4</sub>OAc 溶性磷(Ca<sub>8</sub>-P)、NaOH-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶性磷(Fe-P)、NH<sub>4</sub>F 溶性磷(Al-P)、闭蓄态磷(O-P)和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶性磷(Ca<sub>10</sub>-P);有机磷的测定采用 Bowman 和 Cole<sup>[15]</sup>有机磷分级方法,包括活性有机磷(LOP)、中等活性有机磷(MLOP)、中稳定性有机磷(MROP)和高稳定性有机

磷(HROP)。

土壤中可溶性有机碳(DOC)含量的测定<sup>[16]</sup>:称取 10 g 鲜土, 装入盛有 50 mL 去离子水的 100 mL 塑料离心管中, 室温下以 200 r/min 振荡浸提 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min 后过 0.45 μm 滤膜, 利用总有机碳分析仪测定浸提液中有机碳含量。土壤交换性钙含量的测定采用 1 mol/L 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法<sup>[17]</sup>。

土壤磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法<sup>[18]</sup>:取 10 g 风干土, 置于 100 mL 容量瓶中, 加入 1.5 mL 甲苯, 轻摇 15 min 后加入磷酸苯二钠溶液 10 mL, 以及相应缓冲液 10 mL, 其中, 酸性磷酸酶(ACP)用 pH 5.0 的醋酸缓冲液, 中性磷酸酶(NP)用 pH 7.0 的柠檬酸缓冲液, 碱性磷酸酶(ALP)用 pH 10.0 的硼酸缓冲液, 摇匀后 37 °C 培养 24 h, 测定磷酸酶活性。

植株全磷含量的测定: 采用浓硫酸-双氧水法消煮, 钼黄显色法测定。

#### 1.4 数据分析

植株磷吸收量(mg/plant)=植株干物质质量(g/plant)×植株磷含量(mg/g)

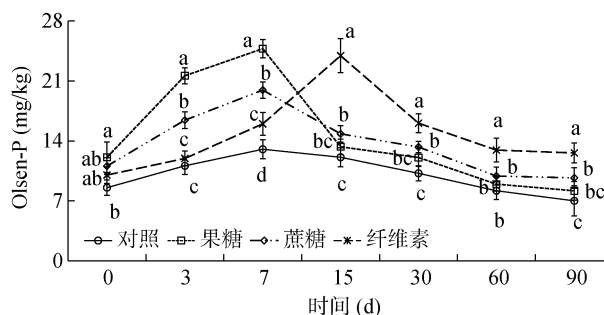
数据分析采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析, 采用 Duncan 多重比较分析组间差异( $P<0.05$ ), 利用 Excel 2021 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同分子量碳源对土壤 Olsen-P 含量动态变化的影响

添加不同分子量碳源后, 土壤 Olsen-P 含量随着时间的变化先增加后降低(图 1), 其中在玉米间苗种植 7 d 后果糖处理达到最大值, 15 d 后纤维素处理达到最大值; 90 d 后纤维素处理的土壤 Olsen-P 含量显著高于其他处理( $P<0.05$ ), 较对照、果糖和蔗糖处理分别提高了 79.74%、54.03% 和 30.03%。90 d 后, 与

对照相比, 果糖处理显著增加了 16.69%, 蔗糖处理和对照处理之间没有显著差异( $P>0.05$ )。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下同)

图 1 不同分子量碳源处理下土壤 Olsen-P 含量变化  
Fig. 1 Changes of soil Olsen-P content under carbon sources with different molecular weights

### 2.2 不同分子量碳源对玉米干物质质量积累和磷吸收量的影响

玉米间苗种植 90 d 后, 纤维素处理玉米植株干物质质量显著高于对照、果糖和蔗糖处理( $P<0.05$ ), 分别提高了 14.02%、11.40% 和 12.01%, 且对照、果糖和蔗糖处理之间无显著差异(图 2A)。添加碳源的处理玉米磷含量显著高于对照处理(图 2B)。玉米磷吸收量变化趋势与干物质质量一致, 纤维素处理较对照、果糖和蔗糖处理分别增加了 46.20%、19.05% 和 19.28%(图 2C)。

### 2.3 不同分子量碳源对土壤无机磷形态的影响

玉米间苗种植 90 d 后, 与对照处理相比较, 添加碳源处理显著提高了土壤  $Ca_8$ -P 含量( $P<0.05$ ), 减少了土壤 Fe-P 和  $Ca_{10}$ -P 含量(图 3A)。相对于果糖和蔗糖处理, 纤维素处理土壤  $Ca_2$ -P 和  $Ca_8$ -P 含量显著增加( $P<0.05$ ), Fe-P 含量显著降低( $P<0.05$ ), 其中  $Ca_2$ -P 含量分别增加了 20.57% 和 24.96%。由图 3B 可以看出, 与对照处理相比较, 纤维素处理下  $Ca_2$ -P 和  $Ca_8$ -P 含量的增加主要来自于 Fe-P 和  $Ca_{10}$ -P 的转化。

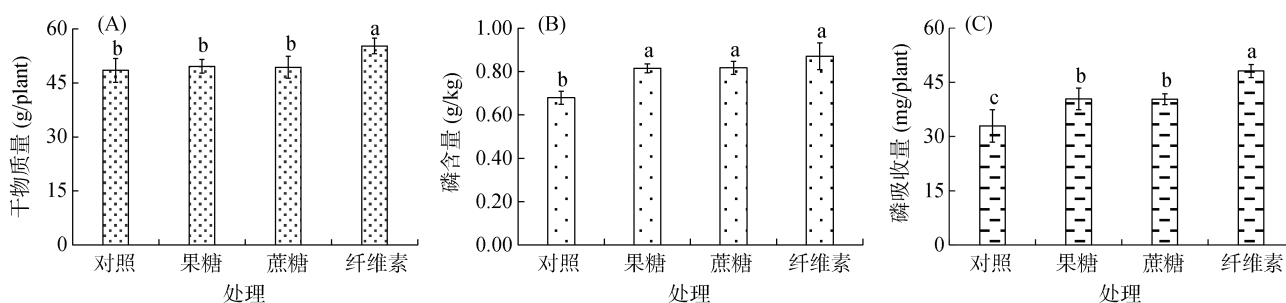


图 2 不同分子量碳源处理下玉米干物质质量(A)、磷含量(B)及磷吸收量(C)

Fig. 2 Dry matter mass (A), P contents (B) and P uptakes (C) of corns under carbon sources with different molecular weights

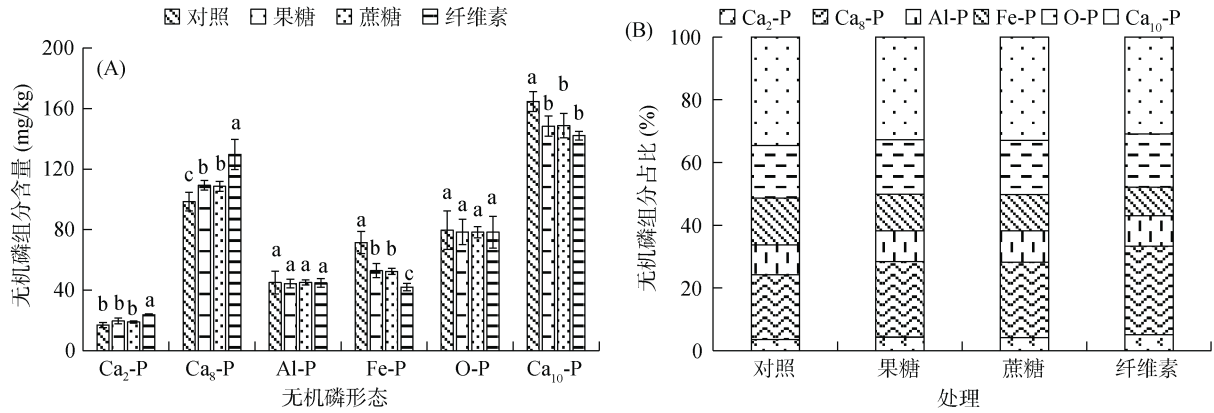


图 3 不同分子量碳源处理下土壤各形态无机磷含量(A)及其占比(B)

Fig. 3 Contents (A) and proportions (B) of soil inorganic P fractions under carbon sources with different molecular weights

2.4 不同分子量碳源对土壤有机磷形态的影响

玉米间苗种植 90 d 后, 与对照、果糖和蔗糖处理相比较, 纤维素处理土壤 LOP 和 MLOP 含量显著增加( $P < 0.05$ ), 但 MROP 含量显著降低( $P < 0.05$ ), 而 HROP 含量则与果糖和蔗糖处理无显著差异, 但显著

低于对照( $P < 0.05$ , 图 4A)。纤维素处理下 LOP 含量较对照、果糖和蔗糖处理显著提高了 165.13%、54.23% 和 45.42% ( $P < 0.05$ )。由图 4B 可以看出, 与对照、果糖和蔗糖处理相比较, 纤维素处理 LOP 和 MLOP 含量的增加来自于 MROP 的转化。

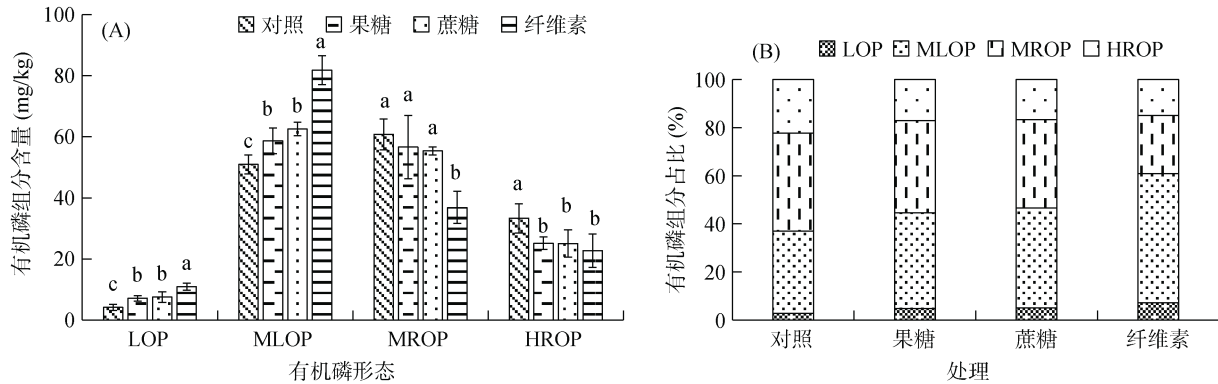


图 4 不同分子量碳源处理下土壤各形态有机磷含量(A)及其占比(B)

Fig. 4 Contents (A) and proportions (B) of soil organic P fractions under carbon sources with different molecular weights

2.5 不同分子量碳源对土壤 pH 变化的影响

玉米间苗种植 90 d 后, 纤维素处理土壤 pH 显著低于其他处理( $P < 0.05$ ), 相较于对照、果糖和蔗糖处理, 分别降低了 4.13%、2.04% 和 3.36%; 果糖处理则显著低于对照和蔗糖处理, 分别减少了 2.13% 和 1.34%; 而对照和蔗糖处理之间无显著差异(图 5)。

2.6 不同分子量碳源对土壤可溶性有机碳和交换性钙含量动态变化的影响

在玉米种植期内, 土壤中 DOC 含量随时间变化先增加后降低, 其中果糖处理在玉米间苗 3 d 后达到最大值, 蔗糖处理在 7 d 后达到最大值, 纤维素处理在 15 d 后达到最大值(图 6A)。玉米间苗种植 90 d 后, 纤维素处理下土壤 DOC 含量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 较对照、果糖和蔗糖处理分别增加了 303.70%、175.95% 和 100.00%, 但对照、果糖和蔗

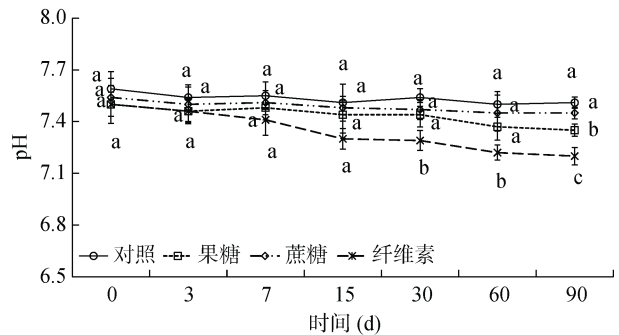


图 5 不同分子量碳源处理下土壤 pH 变化

Fig. 5 Changes of soil pH under carbon sources with different molecular weights

糖处理之间无显著差异; 而纤维素处理土壤可交换性钙含量显著降低, 相较于对照、果糖和蔗糖处理, 分别减少了 58.46%、46.95% 和 46.07%, 而对照、果糖和蔗糖处理之间无显著差异(图 6B)。

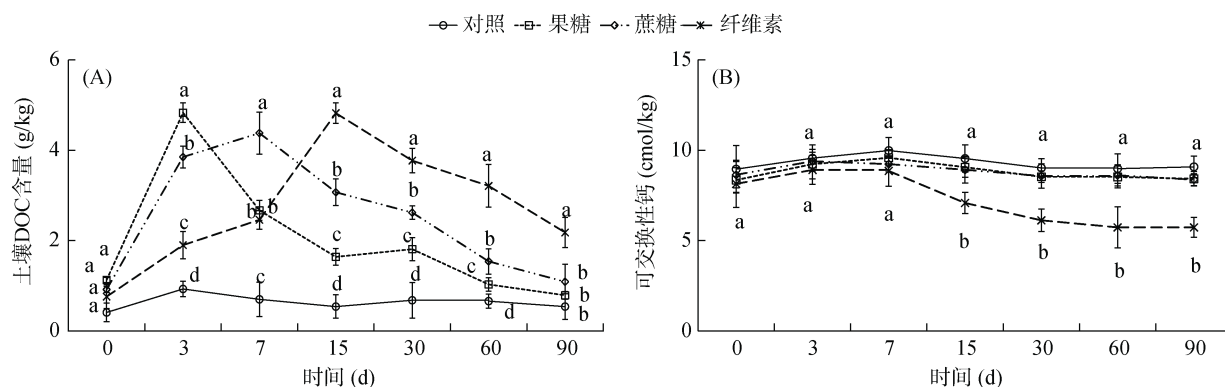


图 6 不同分子量碳源处理下土壤 DOC(A)和交换性钙含量变化(B)

Fig. 6 Changes of soil DOC (A) and exchangeable calcium (B) under carbon sources with different molecular weights

### 2.7 不同分子量碳源对土壤磷酸酶活性的影响

如图 7 所示,玉米间苗种植 90 d 后,添加碳源处理土壤碱性磷酸酶活性显著高于对照处理( $P < 0.05$ )。其中,纤维素处理碱性磷酸酶活性最高,相较于对照、果糖和蔗糖处理分别增加了 37.26%、17.34% 和 26.68%,而果糖和蔗糖处理之间无显著差异。纤维素处理土壤酸性磷酸酶和中性磷酸酶活性显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),但对照、果糖和蔗糖处理之间无显著差异。

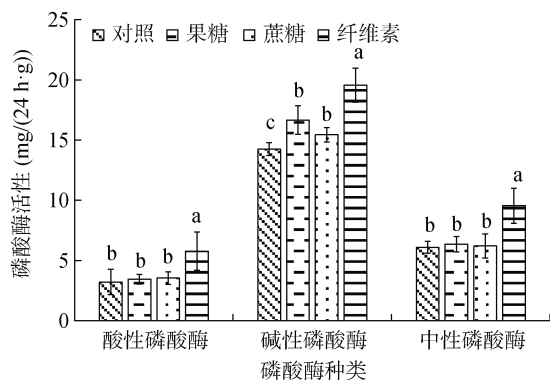


图 7 不同分子量碳源处理下土壤磷酸酶活性

Fig. 7 Soil phosphatase activities under carbon sources with different molecular weights

## 3 讨论

本研究结果显示,不同分子量碳源处理下,土壤 Olsen-P 含量随时间变化规律存在显著差异。在玉米间苗种植前 7 d,果糖处理土壤 Olsen-P 含量最高(图 1),这可能是由于果糖是单糖,可直接作为微生物吸收利用的碳源,提高了微生物的解磷能力<sup>[19]</sup>;而 7 d 后,果糖处理土壤 Olsen-P 含量逐渐降低,这与 Huang 等<sup>[20]</sup>研究结果一致,其也发现在培养后期葡萄糖处理土壤 Olsen-P 含量下降。另外,间苗种植 15 d 后,与其他处理相比较,纤维素处理土壤 Olsen-P 含

量最高,这主要是因为纤维素是高分子化合物,需要先降解成单糖后才可被利用<sup>[21]</sup>,因此纤维素处理下土壤 Olsen-P 含量的增加在种植后期更加显著。

本研究中,玉米间苗种植 90 d 后,对照、果糖和蔗糖处理之间土壤  $Ca_2$ -P 含量无显著差异,相对于对照,纤维素处理土壤  $Ca_2$ -P 和  $Ca_8$ -P 含量显著增加,Fe-P 和  $Ca_{10}$ -P 含量显著降低(图 3)。纤维素处理促进  $Ca_2$ -P 和  $Ca_8$ -P 含量显著增加与土壤性质的变化有关。首先,相比于对照,纤维素处理使土壤 pH 降低了 0.31 个单位(图 5)。已有研究表明,碱性土壤 pH 降低会导致磷酸钙增溶的增加<sup>[22]</sup>,从而促进  $Ca_2$ -P 含量的增加。Huang 等<sup>[20]</sup>研究表明半纤维素可以通过影响微生物的代谢降低土壤 pH。其次,纤维素处理下土壤 DOC 含量显著增加,相较于对照提高了 303.70%(图 6A)。而 DOC 可通过配位交换等方式与土壤矿物吸附位点结合以及与铁铝氧化物络合<sup>[23-24]</sup>,与磷酸根竞争吸附位点,提高土壤磷有效性。有研究表明,无论在红壤上还是在潮土上,DOC 都明显降低土壤对磷的吸附,对土壤本身固有的磷也存在明显的解吸作用<sup>[25]</sup>。而纤维素降解产生的 DOC 含量随时间的变化逐渐高于果糖和蔗糖。最后,纤维素处理显著降低了土壤交换性钙含量(图 6B)。纤维素是一种高分子物质,含各种官能团如羟基、羧基、甲氧基和酚基<sup>[26]</sup>,这些官能团较高的阳离子代换量对钙有很强的吸附性能,可降低交换性钙含量<sup>[27]</sup>,而交换性钙对磷酸根离子的结合能力强,降低了交换性钙含量,从而提高了土壤磷素有效性<sup>[28]</sup>。

本研究结果显示,玉米间苗种植 90 d 后,与对照、果糖和蔗糖处理相比,纤维素处理显著增加了土壤 LOP 和 MLOP 含量,其中 LOP 含量分别提高了 165.13%、54.23% 和 45.42%,MLOP 含量提高了 60.54%、39.42% 和 30.77%,并显著降低了 MROP

含量(图 4)。这与纤维素处理下较高的磷酸酶活性有关,尤其是土壤碱性磷酸酶活性的提高,能够加速有机磷的矿化<sup>[29]</sup>。本研究中,纤维素处理下土壤磷酸酶活性显著高于其他处理,其中碱性磷酸酶活性最高,可促进土壤中有机磷的转化。Sun 等<sup>[30]</sup>研究结果也显示在旱地土壤中纤维素可以显著提高土壤中磷酸酶活性。同时,本研究中,90 d 后纤维素处理下土壤 DOC 含量显著高于对照、果糖和蔗糖处理(图 6A)。有研究显示,DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源,可为微生物生长提供能源物质<sup>[31]</sup>,而解磷微生物可以通过分泌磷酸酶、植酸酶等胞外酶实现有机磷的矿化<sup>[32]</sup>,DOC 可以促进解磷微生物的生长,从而提高土壤磷素有效性。

玉米磷吸收量与土壤有效磷水平密切相关<sup>[33]</sup>。本研究中,玉米间苗种植 90 d 后,相比于对照、果糖和蔗糖处理,纤维素处理下玉米磷吸收量显著增加了 46.20%、19.05% 和 19.28%,而果糖和蔗糖处理之间没有显著差异(图 2C)。这是因为一方面纤维素处理下玉米干物质质量和磷含量显著高于其他处理,另一方面纤维素处理土壤 Olsen-P 含量相较于对照、果糖和蔗糖处理显著增加。刘宏元等<sup>[34]</sup>研究显示改性纤维素可以提高土壤有效磷含量和作物生物量。邢磊等<sup>[35]</sup>研究表明纤维素对作物株高和地上部分生物量积累有促进作用,可以促进作物对养分的吸收。

#### 4 结论

添加纤维素有利于砂姜黑土磷有效性的提升,土壤 Olsen-P 含量较对照、果糖和蔗糖处理分别提高了 79.74%、54.03% 和 30.03%。纤维素促进了土壤中 Ca<sub>10</sub>-P 和 Fe-P 向 Ca<sub>2</sub>-P 和 Ca<sub>8</sub>-P 的转化,中稳定性有机磷(MROP)和高稳定性有机磷(HROP)向中等活性有机磷(MLOP)和活性有机磷(LOP)的转化,且其对玉米生长和磷吸收的促进作用显著强于果糖和蔗糖。因此,从整个培养期看,与低分子量碳源(果糖和蔗糖)相比,高分子量碳源(纤维素)更有利于砂姜黑土固有磷素高效利用。

#### 参考文献:

[1] 李宁,王珊珊,马丽丽,等. 两株高效溶磷菌的溶磷能力及其对玉米生长和红壤磷素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 275-283.

[2] 骆妍妃,覃潇敏,农玉琴,等. 不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 72-79.

[3] 王亚麒,刘京,苟剑渝,等. 长期有机无机配施下烤烟-玉米轮作优化土壤微生物活化无机磷[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 808-818.

[4] 高天一,李娜,彭靖,等. 连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1451-1460.

[5] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 522-537.

[6] 展晓莹,任意,张淑香,等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728-4737.

[7] Turrión M B, Bueis T, Lafuente F, et al. Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 374-382.

[8] 陈倩,穆环珍,黄衍初,等. 木质素对土壤磷素形态转化及对磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 745-748.

[9] Zhang L, Feng G, Declerck S. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. The ISME Journal, 2018, 12(10): 2339-2351.

[10] Wu J S, Huang M, Xiao H A, et al. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered subtropical soil following organic amendments[J]. Plant and Soil, 2007, 290(1): 333-342.

[11] 周文杰,张鹏,秦嗣军,等. 添加葡萄糖和淀粉对盆栽甜樱桃根区土壤碳代谢及根功能的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3300-3308.

[12] 麻井彪,高洁,张建菲. 缓释肥对紫色土油菜生长和养分吸收利用的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 1040-1050.

[13] 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.

[14] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102, 110.

[15] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95-101.

[16] 简兴,翟晓钰,王喻,等. 土地利用方式改变对湿地土壤总有机碳与可溶性有机碳的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 475-482.

[17] 邓爱妮,周聪,赵敏,等. 改良营养液对大棚酸性土壤交换性钙镁和有效态铜锰锌铁的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 267-271.

[18] 战厚强. 水稻秸秆还田对土壤酶活性及土壤养分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.

[19] Zhang L, Feng G, Declerck S. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. The ISME Journal, 2018, 12(10): 2339-2351.

[20] Huang Y L, Dai Z M, Lin J H, et al. Contrasting effects of carbon source recalcitrance on soil phosphorus availability

- and communities of phosphorus solubilizing microorganisms[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113426.
- [21] 周文杰, 张鹏, 秦嗣军, 等. 外源纤维素对樱桃根域土壤微生物的影响[J]. *果树学报*, 2014, 31(S1): 117-123.
- [22] Wei Y Q, Zhao Y, Shi M Z, et al. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 190-199.
- [23] 王磊, 应蓉蓉, 石佳奇, 等. 土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 805-818.
- [24] 梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 长期不同施肥土壤对可溶性有机碳的吸附特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1915-1925.
- [25] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 758-764.
- [26] 邢磊, 杨世琦. 改性纤维素的吸附性能及应用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(3): 59-65.
- [27] 彭赞文, 刘茜, 瞿小杰, 等. 茶园土壤交换性钙镁离子含量及其与主要养分相关性[J]. *吉林农业大学学报*, 2023, 45(1): 77-82.
- [28] 胡宁, 袁红, 蓝家程, 等. 岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7393-7402.
- [29] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施肥条件下栗褐土碱性磷酸酶活性及其与磷形态的关系[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 678-682.
- [30] Sun Q, Qiu H S, Hu Y J, et al. Cellulose and lignin regulate partitioning of soil phosphorus fractions and alkaline phosphomonoesterase encoding bacterial community in phosphorus-deficient soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(1): 31-42.
- [31] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [32] 李慧敏, 王瑞, 施卫明, 等. 菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 668-675.
- [33] 刘道, 刘梦洁, 梁飞, 等. 滴施不同水溶性磷肥对石灰性土壤磷分布及玉米磷素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1720-1733.
- [34] 刘宏元, 周志花, 赵光昕, 等. 改性纤维素对旱稻萌发和旱地土壤性质的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(5): 168-175.
- [35] 邢磊, 杨世琦. 改性纤维素对盆栽小麦生长及土壤水分和养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(4): 536-545.