



魏露露, 平怀香, 陈硕, 梁斌, 陈清, 郝祥蕊, 崔建宇. 增碳控磷对设施土壤磷素有效性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 27-37.  
WEI Lulu, PING Huaixiang, CHEN Shuo, LIANG Bin, CHEN Qing, HAO Xiangrui, CUI Jianyu. Effects of increasing carbon with P fertilizer on phosphorus availability in greenhouse soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 27-37.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.10.03

## 增碳控磷对设施土壤磷素有效性的影响

魏露露<sup>1</sup> 平怀香<sup>1</sup> 陈硕<sup>1</sup> 梁斌<sup>2</sup> 陈清<sup>1</sup> 郝祥蕊<sup>3</sup> 崔建宇<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193;

2. 青岛农业大学 农业资源与环境学院, 山东 青岛 266000;

3. 上海农乐生物制品股份有限公司, 上海 201419)

**摘要** 为解决设施菜田粪肥施用过量导致的土壤磷素累积和环境风险问题,本研究以设施菜田中的磷素管理措施为研究对象,基于寿光田间定位试验,设置了稻壳不还田施用磷肥( $S_0P_{52}$ )、稻壳还田配施磷肥( $S_{20}P_{52}$ )、稻壳不还田且不施用磷肥( $S_0P_0$ )和稻壳还田不施用磷肥( $S_{20}P_0$ )4个处理,利用薄膜扩散梯度技术(Diffusive gradients in thin films technique, DGT)和生物有效磷分组方法对土壤磷素进行表征,探究外加碳源的同时控制磷肥投入对设施番茄产量及土壤磷素盈余、土壤基本理化性质和磷素有效性的影响,并结合土壤化学性质和微生物量等探究影响磷素有效性的主要因素。结果表明不同施肥处理土壤磷素盈余为 47.3~153.0 kg/hm<sup>2</sup>,且各处理间差异明显。具体表现如下:无论施磷或不施磷条件下,与不增碳处理比较,增碳处理均显著增加了土壤有机质含量,分别增加了 1.49 和 1.66 倍,并改变了微生物活性和磷酸酶活性;在施用磷肥基础上,增碳处理土壤 TP、Olsen-P 和 DGT-P 含量分别提升了 2.15、1.66 和 2.79 倍;在不施磷肥基础上,增碳处理对土壤 MBC、MBP 和 DGT-P 含量分别增加了 1.46、4.99 和 2.75 倍,并能够保证在维持磷素供应的同时降低  $CaCl_2$ -P 水平,降低环境风险。因此,稻壳还田不施用磷肥措施能够保证番茄产量和生物有效磷水平,可作为集约化设施菜田土壤源头磷素管控的推荐施肥方案。

**关键词** 增施稻壳; 控施磷肥; 磷有效性; 设施菜田; 番茄产量

中图分类号 S151.9

文章编号 1007-4333(2023)10-0027-11

文献标志码 A

## Effects of increasing carbon with P fertilizer on phosphorus availability in greenhouse soil

WEI Lulu<sup>1</sup>, PING Huaixiang<sup>1</sup>, CHEN Shuo<sup>1</sup>, LIANG Bin<sup>2</sup>, CHEN Qing<sup>1</sup>, HAO Xiangrui<sup>3</sup>, CUI Jianyu<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266000, China;

3. Shanghai Nongle Biological Products Company Limited, Shanghai 201419, China)

**Abstract** Excessive manure application in vegetable production fields has led to soil phosphorus (P) accumulation and environmental risk. The impact of reducing P fertilizer and carbon source input on tomato yield, soil P surplus, soil chemical properties, and soil P availability were investigated. Field experiment was conducted in Shouguang with 4 treatments as follows: P fertilizer without rice husk ( $S_0P_{52}$ ), rice husk with P fertilizer ( $S_{20}P_{52}$ ), no rich husk and P ( $S_0P_0$ ) and rice husk without P fertilizer ( $S_{20}P_0$ ). The diffusive gradients in thin films technique (DGT) and biologically-based P (BBP) were used to measure soil P forms, combining with soil chemical properties and microbial biomass to

收稿日期: 2023-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077089)

第一作者: 魏露露(ORCID:0000-0003-2533-6806), 博士研究生, E-mail: weilulu\_0@163.com

通讯作者: 崔建宇(ORCID:00009-0008-7727-5885), 副教授, 主要从事作物养分管理及土壤质量研究, E-mail: cuijy@cau.edu.cn

explore the main factors affecting soil P availability. The result showed that: The soil P surplus has significant difference among treatments, ranged from 47.3 to 153.0 kg/hm<sup>2</sup>. Compared with the treatments without C input, C input in both S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> and S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> treatments significantly increased soil organic matter content by 1.49 and 1.66 times, respectively, as well as changed soil microbial activity and phosphatase activity. Under the condition of applying P fertilizer, the contents of TP, Olsen-P and DGT-P in the soil received C increased by 2.15, 1.66 and 2.79 times, respectively, compared with the soil without C. Without P fertilizer, the contents of MBC, MBP and DGT-P in soil received C increased by 1.46, 4.99 and 2.75 times, respectively. Meanwhile, the S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> treatment decreased the level of CaCl<sub>2</sub>-P while maintained P supply, thus reducing environmental risks. In conclusion, the measures for increasing C and reducing P fertilizer can ensure tomato yields and maintain the biological available P level and is recommended as the fertilization scheme for controlling P in intensive vegetable fields.

**Keywords** increased application of rice husk; controlled application of phosphate fertilizer; phosphorus availability; facility vegetable field; tomato yield

设施蔬菜生产具有高度集约化的特点<sup>[1]</sup>，“十三五”期间我国设施蔬菜面积基本稳定在410万hm<sup>2</sup>，年均增长率1%左右<sup>[2]</sup>。设施菜田由于其高温高湿的环境特点，加快了土壤有机质的分解矿化从而导致土壤有机碳储量较低，限制作物的快速生长，因此，人们往往通过投入大量粪肥补充设施土壤有机质，进而提升土壤肥力。然而，在设施菜田等集约化生产体系中，粪肥的过量施用导致其投入的磷含量占总磷投入的54.3%<sup>[3]</sup>。已有研究表明，山东省寿光市不同类型蔬菜生产体系中每年的P投入为772~2458 kg/hm<sup>2</sup>，蔬菜P吸收量为47.8~155.0 kg/hm<sup>2</sup>，P盈余量为711~2303 kg/hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>；重庆市铜梁区蔬菜生产磷素平均施用量为140 kg/hm<sup>2</sup>，平均超过推荐用量的2.23倍，其中粪肥P用量为106 kg/hm<sup>2</sup>，占总磷投入的75.4%<sup>[5]</sup>；黄淮海地区塑料棚黄瓜生产体系中单季P投入量为447 kg/hm<sup>2</sup>，其中有机肥中的P投入为271 kg/hm<sup>2</sup>，占总P投入的60.6%<sup>[6]</sup>。设施蔬菜种植过程中，往往以蔬菜氮需求作为肥料施用量的条件而导致大量磷素投入，不仅造成了严重的资源浪费，同时当土壤中的磷素累积超过某一临界值时，土壤磷素淋失量就会加剧，造成水体富营养化等环境问题<sup>[7-8]</sup>。

我国粮食作物资源庞大，秸秆和稻壳的年均产量约8.65亿t<sup>[9]</sup>。研究表明，秸秆/稻壳还田可以改善土壤理化性质、水分和热量条件，增加土壤养分含量和微生物数量，在很大程度上增加有机碳输入和固持<sup>[10-12]</sup>。土壤碳氮磷化学计量比(C:N:P)能够反映土壤肥力和养分限制状况，在一般情况下，土壤中的C:N:P比例越高，表明土壤有机质含量相对较高。相反，C:N:P比例较低，则表明土壤通常处于碳限制状态，不利于植物的生长<sup>[13]</sup>。全球土

壤C:N:P为286:17:1<sup>[14]</sup>，我国农田土壤C:N:P为60:5:1，其中表层土壤C:N:P为134:9:1<sup>[15]</sup>。部分集约化种植土壤的平均C:N:P比例只有25:2:1<sup>[16]</sup>，显著低于其它土壤体系，呈现出土壤碳限制状态，不利于生物活性及其对磷素等养分的循环和周转。利用稻壳提高设施菜田C/P比值能够提高土壤磷素供应能力。施用稻壳对土壤磷转化的生物过程主要集中在短时间内，具体表现为微生物分解稻壳中易溶的淀粉、氨基酸和糖类等从而获取碳源，并释放出矿质养分，同时微生物为保持自身碳氮磷化学计量比的平衡，通过分泌磷酸酶促进有机磷的矿化或是促进对无机磷的生物固持<sup>[17]</sup>。研究表明：稻壳还田不仅能够提高土壤有机磷库的含量，也能促进土壤中磷素的持续供应<sup>[17]</sup>；稻壳还田通过提供丰富的易利用碳含量增加了土壤微生物的数量和活性，提高了土壤磷酸酶活性，促进有机磷进一步矿化为无机磷<sup>[18]</sup>。因此，在土壤有机碳为主要限制因子的土壤体系中，外源有机碳的投入可能通过刺激微生物活性提高微生物量库和磷酸酶活性，进而活化土壤磷素，提高磷素利用效率。

仅凭一个指标，无法准确反应任一种土壤的可用磷含量，因此有效评估土壤磷的可利用性对于农业生产十分重要<sup>[19]</sup>。梯度扩散薄膜技术(Diffusive gradients in thin films, DGT)和生物有效磷分组(Biologically-based phosphorus)方法都可以用来表征土壤中磷素的有效性，但它们基于不同的原理和机制。DGT是一种原位被动采样技术，用于研究土壤中磷的生物有效性或迁移特性<sup>[20]</sup>。生物有效磷分组方法是Deluca等<sup>[21]</sup>根据生物有效性程度研究的一种磷素分级方法，主要考虑微生物分

泌有机酸、酸性磷酸酶等活化的磷表征磷形态,蔡观等<sup>[22]</sup>在此基础上对该方法进行了优化,将生物有效磷分为 4 个组分:1)0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 提取的可溶性无机磷(CaCl<sub>2</sub>-P);2)10 mmol/L 柠檬酸提取的能被有机酸活化释放的潜在可溶性无机磷(Citrate-P);3)0.02 EU/mL 酶提取的易被酸性、碱性磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷(Enzyme-P);4)1 mol/L 盐酸提取的氢质子活化的最大潜力磷库(HCl-P)。因此,这 2 种方法可以在不同的方面提供对土壤磷素有效性的信息,并相互补充。

目前对缓解设施菜田土壤磷素累积的研究主要集中在减施磷肥上<sup>[23-24]</sup>,但在碳限制相对突出的设施菜田中很少有研究考虑碳磷耦合的关系。因此,本研究拟以设施菜田中的磷素管理措施为研究对象,设置了稻壳不还田施用磷肥(S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>)、稻壳还田配施磷肥(S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>)、稻壳不还田且不施用磷肥(S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>)和稻壳还田不施用磷肥(S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>)4 个处理,采用梯度扩散薄膜技术和生物有效磷分组方法在山东寿光设施番茄定位试验中分析增碳控磷对设施土壤磷素有效性的影响,以期为集约化设施菜田精准施用磷肥提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2020 年 8 月在山东省寿光市寨里村(36°55' N, 118°45' E)蔬菜标准中心的温室大棚开展,试验地北濒渤海,属暖温带季风区大陆性气候。全年平均日照总时数 2 548.8 h,年平均气温

12.7 °C,年平均降水量 593.8 mm,季节降水高度集中于夏季(6—8 月)。土壤类型为潮土,且试验开展前无任何种植和施肥记录。试验前(2020 年 8 月)采集 0~20 cm 基础土样,测定土壤 pH 为 8.70,有机质为 9.95 g/kg,全磷为 0.60 g/kg,速效磷为 13.70 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验共布置 4 个施肥处理:1)稻壳不还田施用磷肥(S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>);2)稻壳还田配施磷肥(S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>);3)稻壳不还田且不施用磷肥(S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>);4)稻壳还田不施用磷肥(S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>)。常规粪肥和常规磷肥为当地传统的施肥方式,常规粪肥的用量为 20 t/hm<sup>2</sup>,常规施磷量为 52 kg/hm<sup>2</sup>。对粪肥施用量进行优化,即根据番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)目标产量 120 t/hm<sup>2</sup>(传统施肥平均产量)的需磷量确定粪肥施用量,为 3.3 t/hm<sup>2</sup>,利用稻壳(20 t/hm<sup>2</sup>)补充有机碳。各处理施肥量见表 1,所有处理施用等量粪肥,即鸡粪。供试肥料包括基肥和追肥,基肥为鸡粪(N、P、K 质量分数分别为 15.4、36.4 和 24.5 g/kg)和稻壳(N、P、K 质量分数分别为 4.80、3.20 和 2.70 g/kg),鸡粪和稻壳在作物种植前均匀撒施后翻耕,追肥为硝酸钾、硝酸钙、磷酸二氢钾和硫酸钾,在作物生长季随灌溉水施入土壤。每个处理重复 3 次,采用随机区组排列,单个小区面积 31.5 m<sup>2</sup>。番茄于 2021 年 2 月份定植,8 月份拉秧。番茄采用双行种植,起小垄栽培,垄长 7.5 m,垄宽 50 cm,垄距 40 cm,株距 40 cm,采用水肥一体化覆膜滴灌。田间管理采用当地常规栽培管理措施,滴灌追肥,3 穗果打顶。

表 1 本研究 4 个不同处理的碳投入和施肥量

Table 1 This study investigates four different treatments of carbon input and fertilization rate

处理 Treatment	鸡粪用量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Chicken manure	稻壳用量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Rice husks	碳投入/(kg/hm <sup>2</sup> )			施肥量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Fertilization		
			鸡粪 Chicken manure	稻壳 Rice husks	总计 Total input	N	P	K
稻壳不还田施用磷肥 S <sub>0</sub> P <sub>52</sub>	3.3	0	743	0	743	300	52	455
稻壳还田配施磷肥 S <sub>20</sub> P <sub>52</sub>	3.3	20	743	7 180	7 923	300	52	455
稻壳不还田且不施磷肥 S <sub>0</sub> P <sub>0</sub>	3.3	0	743	0	743	300	0	455
稻壳还田不施用磷肥 S <sub>20</sub> P <sub>0</sub>	3.3	20	743	7 180	7 923	300	0	455

### 1.3 样品采集与测定

#### 1.3.1 土壤样品采集

2021年8月番茄收获完全后采集0~20 cm土壤样品,每小区随机取6点,土壤样品混匀后,一部分进行风干,另一部分置于4℃下鲜样保存。

#### 1.3.2 番茄产量的测定

每小区选取6株典型作物,在果实成熟后分批采收、称重并计数,直至采收结束,并算出平均值,结合株数,用以计算各小区的总产量。

#### 1.3.3 测定指标与方法

土壤pH:土壤样品混匀过2 mm筛后,称取5 g土样,加水浸提(土水质量比1:5)后用pH计测定。土壤有机质(OM)采用重铬酸钾氧化法。土壤速效磷(Olsen-P)采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH=8.5)溶液提取(土水质量比1:20)并用钼锑抗比色法测定<sup>[25]</sup>。土壤总磷(TP)利用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和HClO<sub>4</sub>消煮后钼锑抗比色法测定<sup>[26]</sup>。土壤微生物量碳和磷(MBC和MBP)通过氯仿熏蒸法,其中碳含量利用重铬酸钾氧化法测定,磷含量利用钼锑抗比色法测定<sup>[27-28]</sup>。土壤酸性磷酸单酯酶(ACP)和碱性磷酸单酯酶(ALP)均采用荧光微型板酶检测技术测定<sup>[29]</sup>。

分别用0.01 mol/L的CaCl<sub>2</sub>、0.01 mol/L的柠檬酸、0.02 EU/mL的酶液和1 mol/L的HCl溶液对土样进行浸提,然后用孔雀石绿法和钼锑抗比色法对磷组分进行测定<sup>[21-22]</sup>。

#### 1.3.4 土壤磷素表观盈余及DGT-P测定和计算方法

土壤磷素表观盈余(Soil phosphorus apparent surplus, SPAS)是指土壤中磷素的积累量,是土壤中磷素含量与植物对磷素的需求量之间的差值<sup>[23]</sup>。土壤磷素盈余是衡量土壤磷素水平的重要指标之一,旨在评估土壤中磷素的供应能力,为土壤的施肥管理提供重要的参考,具体计算公式如下:

$$SPAS = PI - PUF - PUB$$

式中:PI为磷投入量,kg/hm<sup>2</sup>;PUF为果实携出量,kg/hm<sup>2</sup>;PUB为植物携出量,kg/hm<sup>2</sup>。植物和果实磷含量采用硫酸消解-钒钼黄分光光度法测算<sup>[26]</sup>。

为测定土壤DGT-P含量,称取约30 g过2 mm筛的风干土壤样品于准备好的塑料小盒子中,加水至饱和,于室温下放置24 h。将DGT装置垂直小心压入土壤中,使其和土壤充分接触,盖好塑料盖。24 h后取出DGT装置,用蒸馏水冲洗其表面泥土

直至清洁,拆开DGT装置,将吸附胶放入10 mL离心管中,加1 mL 1 mol/L HCl,静置16 h以上将吸附胶上吸附的磷洗涤下来。待测液中的磷用钼蓝比色法测定。测量期间DGT与土壤界面的平均浓度C<sub>DGT</sub>(μg/L)的计算公式为:

$$C_{DGT} = \frac{M\Delta g}{D\Delta t}$$

式中:M为待测物质在吸附胶上的积累量,ng;Δg为扩散胶与滤纸的距离,cm;t为吸附时间,s;D为待测元素在扩散胶里的扩散系数,cm<sup>2</sup>/s。

### 1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2016进行数据的整理,数据的柱状图用Origin 2016绘制,指标之间的差异性检验在SPSS中采用单因素方差分析(ANOVA)进行,对于影响磷素组分的显著相关的因子筛选通过ADONIS进行(vegan包,R 3.5.1),其中显著相关的因子(P<0.05)进一步进行冗余分析,同时排除存在多重共线性的因子(VIF>10),最后,利用ANOVA再对RDA进行检验,得出其中最重要的关键影响因素。土壤理化性质间的相关性利用Pearson通过R(Hmisc包,R 3.5.1)检验。

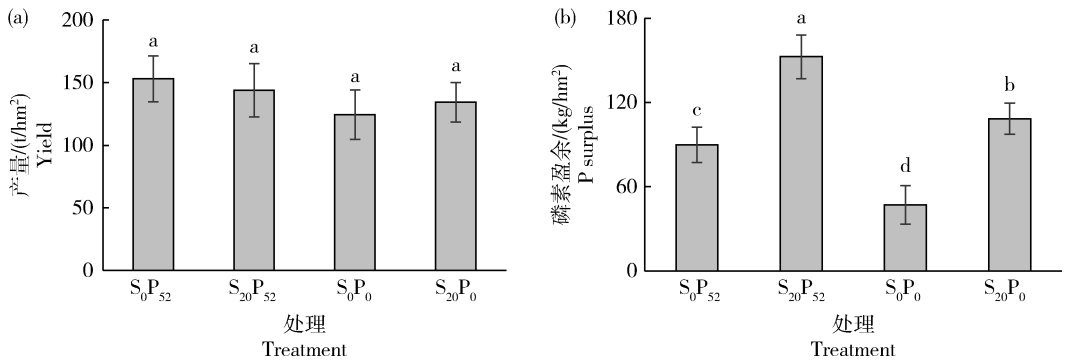
## 2 结果与分析

### 2.1 增碳控磷对番茄产量和磷素盈余的影响

增碳控磷对番茄产量和磷素盈余影响的结果见图1。可知增碳控磷对设施番茄产量影响不显著:各个施肥处理的番茄产量为130~153 t/hm<sup>2</sup>,均达到120 t/hm<sup>2</sup>的目标产量;土壤磷素表观盈余量为47.3~153.0 kg/hm<sup>2</sup>,且不同处理间均存在显著差异,其中S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>>S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>。

### 2.2 增碳控磷对土壤基本理化性质的影响

表2为增碳控磷措施对土壤基本理化性质的影响。可知:不同处理土壤pH为8.25~8.45,其中施磷处理(S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>和S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>)显著高于稻壳不还田且不施用磷肥处理S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>;不同处理有机质含量变化范围为8.47~14.60 g/kg,其中施用稻壳(S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>、S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>)显著提高表层土壤有机质含量;全磷含量变化与速效磷相似,范围分别为0.31~0.68 g/kg、29.5~49.0 mg/kg,其中稻壳不还田施用磷肥处理S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>磷水平显著低于其它处理;不同施肥处理土壤C/P范围为8.85~15.60,其中稻壳不还田施用磷肥S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>和稻壳还田不施用磷肥S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>处理显著高于稻壳不还田且不施用磷肥处理S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>。



柱形图上方不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference in different treatments (P<0.05). The same below.

图 1 增碳控磷对番茄产量(a)和磷素盈余(b)的影响

Fig. 1 Effects of increasing C with P reduction on tomato yield (a) and P surplus (b)

表 2 增碳控磷对土壤基本理化性质的影响

Table 2 Effects of increasing C with P reduction on soil basic nutrient characteristics

处理 Treatment	pH	有机碳/ (g/kg) Organic carbon	全磷/(g/kg) Total phosphorus	速效磷/ (mg/kg) Olsen-P	碳磷比 Carbon and total phosphorus ratio
稻壳不还田施用磷肥 S <sub>0</sub> P <sub>52</sub>	8.45±0.14 a	4.91±0.78 b	0.31±0.01 b	29.5±1.37 c	15.6±2.38 a
稻壳还田配施磷肥 S <sub>20</sub> P <sub>52</sub>	8.34±0.01 a	7.30±0.89 a	0.68±0.15 a	49.0±8.52 a	11.1±2.37 ab
稻壳不还田且不施用磷肥 S <sub>0</sub> P <sub>0</sub>	8.25±0.02 b	5.09±0.43 b	0.58±0.03 a	36.7±2.78 b	8.85±1.11 b
稻壳还田不施用磷肥 S <sub>20</sub> P <sub>0</sub>	8.28±0.05 ab	8.47±1.50 a	0.68±0.19 a	36.4±5.42 abc	12.8±2.52 a

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference in different treatments (P<0.05).

### 2.3 增碳控磷对土壤 DGT-P 和生物有效磷组分的影响

增碳控磷处理对土壤 DGT-P 影响的结果见图 2。可知：增碳控磷措施对土壤 DGT-P 和各生物有效磷组分的影响各不相同。不同施肥处理土壤 DGT-P 含量变化范围为 46.7~200.0 μg/L，其中 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>>S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>。与稻壳不还田施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> 相比，增碳显著提高土壤 DGT-P 含量；与稻壳还田配施磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> 相比，减磷(S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>)对 DGT-P 没有显著影响。增碳控磷对土壤各生物有效磷组分的影响各不相同(图 3)。不同施肥处理土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量较低，且处理间差异不显著；不同施肥处理土壤 Enzyme-P 含量为 13.0~23.1 mg/kg，其中 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>>S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>>S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>，施用磷肥条件下，稻壳还田与不还田处理(S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>、S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>)的土壤

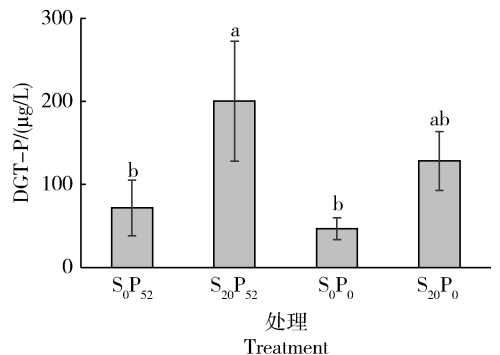


图 2 增碳控磷对土壤 DGT-P 的影响

Fig. 2 Effects of increasing C with P reduction on soil DGT-P

Enzyme-P 含量差异显著；不同施肥处理土壤 Citrate-P 含量为 60.0~109.0 mg/kg，其中 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>>

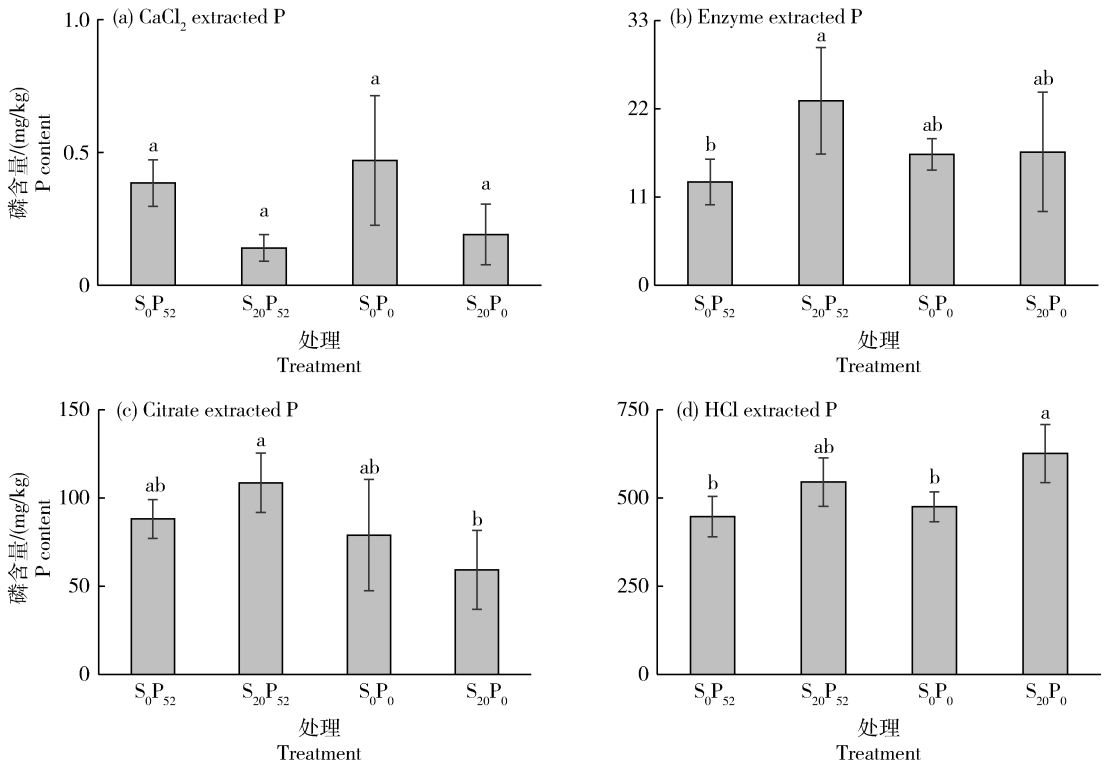


图3 增碳控磷对土壤生物有效磷含量的影响

Fig. 3 Effects of increasing C with P reduction on soil biologically-based phosphorus

S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>, 稻壳还田条件下, 施磷肥与不施磷肥处理 (S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>、S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>) 的土壤 Citrate-P 含量差异显著; 不同施肥处理土壤 HCl-P 含量为 449 ~ 629 mg/kg, 其中 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>, 稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 与无论是否施用磷肥, 稻壳不还田处理 (S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>、S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>) 的土壤 HCl-P 含量差异显著。不同稻壳和磷肥投入对土壤中的磷素组成和含量产生了一定影响 (除了 CaCl<sub>2</sub>-P)。在不增碳条件下, 与施用磷肥相比, 减施磷肥对各生物有效磷组分的影响均不显著; 在增碳条件下, 与施用磷肥相比, 减施磷肥使土壤 Citrate-P 含量显著降低了 45.0% 而对其它生物有效磷组分无显著影响。

#### 2.4 增碳控磷对土壤微生物量和酶活性的影响

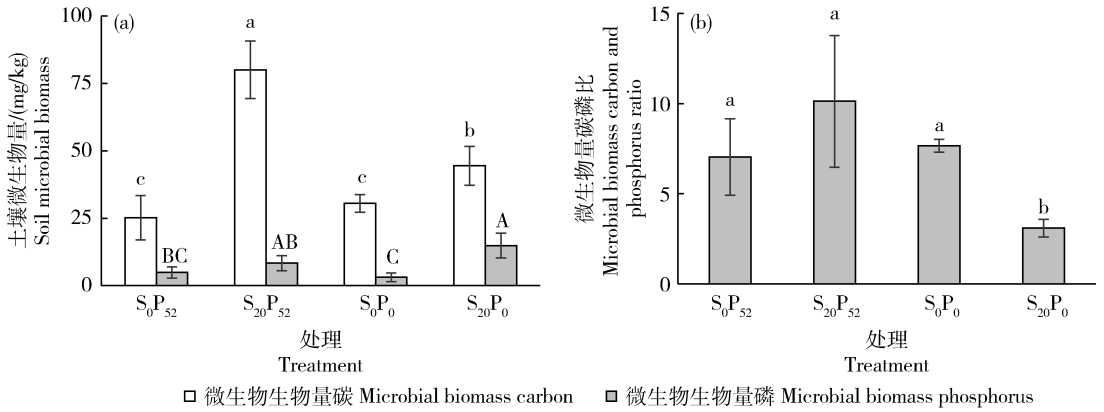
增碳控磷处理对土壤微生物量碳磷及微生物量碳磷比影响的结果见图 4。可知: 不同处理土壤微生物量碳含量为 25.1 ~ 80.0 mg/kg, 其中 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>, 其中稻壳还田配施磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> 显著高于其它处理, 稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 显著高于减碳处理 (S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> 和 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>); 土壤微生物量磷含量为 2.96 ~ 14.80 mg/kg, 其中 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>, 其中稻壳还田不施用磷肥处

理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 显著高于减碳处理 (S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> 和 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>)。不同施肥处理土壤 MBC/MBP 变化范围为 2.20 ~ 14.40, 其中稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 是 4 种处理中最低的。

增碳控磷处理对土壤碱性和酸性磷酸酶活性影响的结果见图 5。可知: 不同施肥处理土壤碱性磷酸酶活性为 65.6 ~ 120.0 nmol/(g · h), 其中 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>, 稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 显著高于其它处理, 稻壳还田配施磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> 和稻壳不还田且不施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> 显著高于稻壳不还田施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>; 不同施肥处理土壤酸性磷酸酶活性为 336.0 ~ 467.0 nmol/(g · h), 其中 S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> > S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>, 稻壳不还田施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>52</sub> 显著高于稻壳还田配施磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub> 和稻壳不还田且不施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>。

#### 2.5 土壤磷组分与相关土壤性质的关系

以土壤磷的不同形态 (Olsen-P、MBP、HCl-P、Citrate-P、Enzyme-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P) 为响应变量, 土壤 pH、DOC、SOC、MBC、ACP 和 ALP 等土壤测试指标为解释变量进行冗余分析 (图 6), 结果表明 RDA 第一排序轴和第二排序轴分别解释了上述测试指标



不同小写字母代表不同处理间土壤微生物量碳差异显著,不同大写字母代表不同处理间微生物量磷差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant difference of MBC and MBC/MBP in different treatments, different capital letters indicate significant difference of MBP in different treatments ( $P < 0.05$ )。

图 4 增碳控磷对土壤微生物量(a)及微生物量碳磷比(b)的影响

Fig. 4 Effects of increasing C with P reduction on soil microbial biomass (a) and MBC/MBP (b)

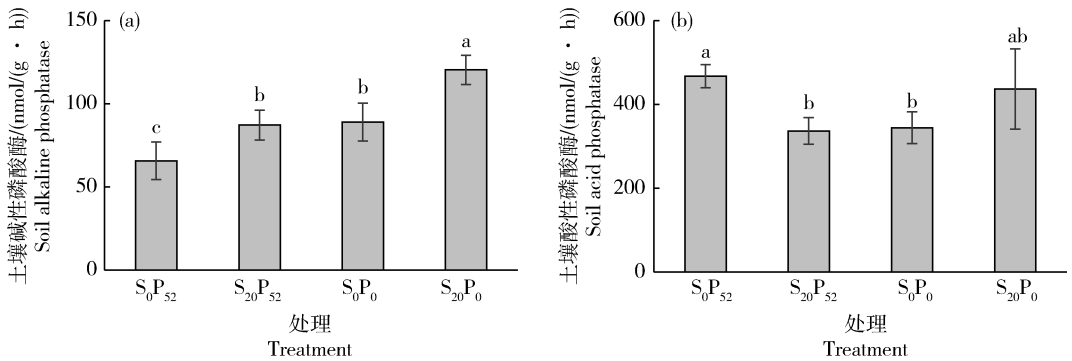


图 5 增碳控磷对土壤碱性(a)和酸性(b)磷酸酶活性的影响

Fig. 5 Effects of increasing C with P reduction on soil alkaline (a) and acid (b) phosphatase activities

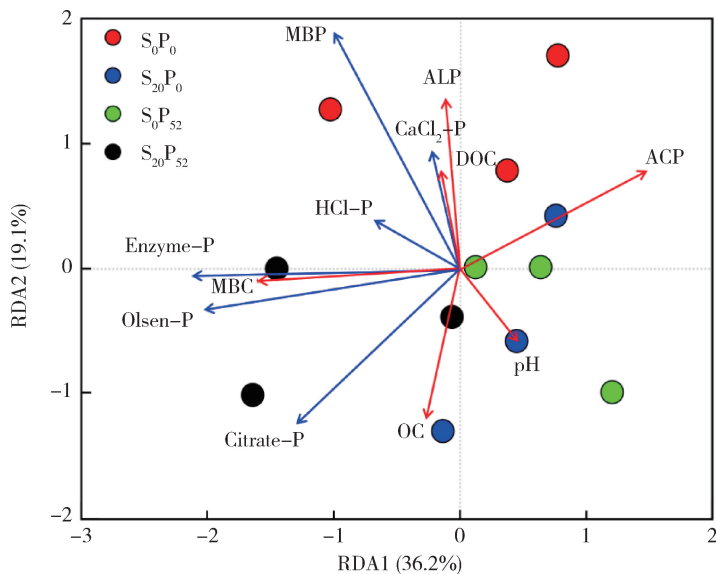


图 6 土壤理化性质和磷素形态间的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis showing the relationships among soil properties and proportions of phosphorus forms

对土壤磷组分含量变化影响程度的 36.2%和 19.1%。其中:MBC对土壤磷组分的影响最显著,解释了土壤磷变化的 20.5%;其次是 ACP(12.0%)、OC(11.4%)和 ALP(11.1%)。

### 3 讨论

#### 3.1 增碳控磷影响设施番茄产量、磷素盈余和土壤理化性质分析

本研究发现不同施肥处理番茄产量无显著差异且均达到了目标产量 120 t/hm<sup>2</sup>(图 1),这表明即使不施用磷肥,粪肥所含有的磷素,以及稻壳对土壤磷素的活化作用,已经能够满足整个生育期内作物生长的需求,这与 Yu 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。即使降低化学磷肥的投入(S<sub>0</sub>P<sub>0</sub>、S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>)也能保持番茄产量,主要原因有:首先,设施蔬菜长期处于相对较高的温度、水分和频繁的干湿交替环境中,有利于提高土壤磷素有效性<sup>[17]</sup>;其次,稻壳的施用也可以通过提高微生物量磷(图 4)和碱性磷酸酶活性(图 5)来提升微生物对磷素的周转进而在一定程度上提高了残留磷的利用<sup>[31]</sup>。不同处理磷素表观盈余均存在显著差异(图 1),与稻壳不还田且不施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> 相比施用稻壳和磷肥都会显著提高土壤磷素表观盈余,其中稻壳还田配施磷肥 S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>最为明显,稻壳还田不施用磷肥 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 和稻壳不还田施用磷肥 S<sub>0</sub>P<sub>52</sub>次之,这主要是因为肥料的投入为土壤带入了部分外源磷素。且在稻壳还田配施磷肥的基础上减少磷肥,即稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 能在保证番茄产量的基础上降低土壤磷素盈余。

土壤理化性质能够反映土壤环境和对植物的养分供应能力。与稻壳不还田且不施用磷肥处理 S<sub>0</sub>P<sub>0</sub> 相比,增碳控磷(S<sub>20</sub>P<sub>0</sub>、S<sub>20</sub>P<sub>52</sub>)处理可以改变土壤 pH,并显著提高了土壤有机碳和速效磷含量(表 2),这种变化一方面是肥料投入的养分差异性造成的,另一方面是这种差异性带动土壤内部养分循环改变造成的。本研究中施磷和不施磷条件下施用稻壳即增碳显著提高表层土壤有机质含量,这与 Yu 等<sup>[30]</sup>研究结果一致。例如 Luan 等<sup>[33]</sup>的研究通过 10 年长期试验验证了有机物料的添加能够促进土壤有机碳封存,而单独施用化肥则不利于土壤有机碳的积累。这主要是因为稻壳是一种高 C/P 比有机物料,在土壤有机碳为主要限制因子的设施菜田土壤体系中,稻壳施用能在显著提升高活性有机碳含量的同时增加稳定性有机碳的比例,协调有机

碳的矿化与固持,增加有机碳固存<sup>[32]</sup>。

#### 3.2 增碳控磷影响土壤磷素有效性分析

在施磷条件下,增碳显著提高土壤全磷和速效磷含量(表 2)。一方面,施用稻壳能够提高土壤团聚体含量,改善土壤结构<sup>[34]</sup>,这在一定程度上影响着土壤磷素形态转化;另一方面,稻壳施用极大地增加土壤有机碳储量,对于促进磷素的循环以及在活化土壤磷的生物与非生物过程起着直接或间接的作用,最终提高了土壤磷有效性<sup>[35]</sup>。而不施磷肥条件下稻壳的施用对于土壤速效磷含量的影响不大,这与 Yang 等<sup>[36]</sup>的部分研究结果一致。这可能是因为,施用稻壳后,促进了微生物的生长代谢,微生物会进一步利用磷素来合成自身的微生物生物量,因此微生物会与植物根系竞争土壤中可利用的磷素<sup>[37]</sup>。

DGT 技术所测得的土壤中经扩散的可溶性磷的量可以比较准确地反映植物对磷的需求<sup>[38]</sup>。增碳显著提高表层土壤 DGT-P 含量(图 2),可能是由于稻壳覆盖提高土壤保水控肥能力,降低磷移动性<sup>[20]</sup>;稻壳还田不施用磷肥处理 S<sub>20</sub>P<sub>0</sub> 对 DGT-P 含量影响不显著,可证明该措施是降低磷投入的可行措施。Deluca 等<sup>[21]</sup>和蔡观等<sup>[22]</sup>基于生物利用磷素难易程度提出了基于磷素生物有效性的分级方法,利用不同的提取剂区分磷的生物活性。农田生态系统中磷含量表现为:CaCl<sub>2</sub>-P<Enzyme-P<Citrate-P<HCl-P,这与本研究结果一致(图 3)。Margenot 等<sup>[39]</sup>的研究表明,秸秆还田减少了土壤磷素的固定,并且通过影响土壤 pH 值来增强磷的可用性,但本研究中稻壳施用对土壤 pH 无显著影响(表 2),可能是稻壳分解缓慢,较短的试验时间不足以引起 pH 的显著变化。

施磷条件下增碳显著提高了 Enzyme-P 含量(图 3),这说明稻壳还田主要增加了土壤有机磷库,更有利于土壤中磷素的持续供应<sup>[17]</sup>;另外一方面,稻壳还田经微生物分解产生易溶的淀粉、氨基酸和糖类提供丰富的易利用碳含量,因此微生物代谢活动加强,微生物量库尤其是微生物量碳的含量显著提升(图 4)<sup>[40]</sup>,同时进一步刺激了土壤碱性磷酸酶活性(图 5),促进有机磷矿化为无机磷。因此在增碳控磷模式下微生物量碳解释了土壤磷含量变化的 20.5%。此外,稻壳具有较高的表面积,可以吸附酶促反应的底物从而增加碱性磷酸酶活性<sup>[41]</sup>。而减施磷肥的情况下,施用稻壳显著提高土壤 HCl-



P 含量,这是因为微生物和根系分泌产生的大量质子( $H^+$ )活化了土壤中难溶性矿物质磷,使得 HCl-P 含量显著提升,且稻壳还田不施用磷肥处理  $S_{20}P_0$  显著提高了土壤微生物量磷含量和碱性磷酸酶活性,磷酸酶活性的增加是对缺磷的重要应答机制<sup>[42]</sup>。在缺磷土壤中,稻壳的施用显著提高土壤有机质水平,为微生物活动提供了丰富的碳源和能源。微生物分配更多的资源用于磷素的转化,因此会增强对土壤磷素的生物固定,提高微生物量磷含量,并分泌更多的磷酸酶,将有机养分转化为供植物吸收利用的无机养分,从而在不施磷肥下维持土壤磷素有效性水平。因此,在增碳控磷模式下,微生物量、磷酸酶活性和土壤有机质是影响土壤磷素变化的显著因子。

## 4 结 论

本研究旨在探究外加碳源的同时控制磷肥投入对设施番茄产量及土壤磷素盈余、土壤基本理化性质和磷素有效性的影响。主要结论如下:在稻壳还田条件下,与施用磷肥处理相比,不施磷肥处理在保证番茄产量的同时能够通过降低磷肥的施用量,从源头上减少磷素投入而维持土壤有机质水平,使土壤中的磷素含量不同程度地降低,磷素盈余量从  $153.0 \text{ kg/hm}^2$  降至  $47.3 \text{ kg/hm}^2$ 。因此,该措施在农业生产中,特别是在高投入和灌水量较高的集约化生产体系中,为磷素管理提供了新的思路。无论是施磷肥或不施磷肥情况下,稻壳还田都显著提高了土壤有机质含量。施磷肥和不施磷肥情况下,稻壳还田对于土壤磷含量的影响存在差异:在施用磷肥条件下,增碳使表层土壤 TP 含量提高了 2.15 倍,表层土壤 Olsen-P 含量提高了 1.66 倍,表层土壤 Enzyme-P 含量提高了 1.78 倍而其它生物有效性磷组分和土壤 MBP 含量无显著变化;在不施磷肥条件下,增碳主要是通过提高 HCl-P 含量(1.15 倍)和土壤 MBP 含量(4.93 倍)增加了土壤磷素盈余。稻壳还田不施用磷肥处理  $S_{20}P_0$  通过显著提高 MBP 和碱性磷酸酶活性,加快土壤有机磷的矿化周转过程,维持  $CaCl_2\text{-P}$ 、Enzyme-P 和 HCl-P 水平,满足作物生长需求。稻壳还田不施用磷肥模式下影响土壤磷素含量变化的主要因素是土壤 MBC(20.5%)和 ACP(12.0%)。

土壤磷库具有十分巨大的利用潜力,通过改变施肥物料的碳磷投入,缓解设施菜田碳限制状况,调

节微生物生物量库,促进其分泌更多与磷素循环相关的磷酸酶,是活化土壤磷素的重要过程。增碳有助于提高磷素生物有效性,而增碳条件下不施磷肥则是在此基础上兼顾土壤健康,实现可持续农业发展的有效措施。

## 参考文献 References

- [1] Kalkhajah Y K, Huang B, Sørensen H, Holm P E, Hansen C B. Phosphorus accumulation and leaching risk of greenhouse vegetable soils in Southeast China[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(5): 683-693
- [2] Wang Y F, Dannemann M, Lin S, Lv H F, Li G Y, Lian X J, Wang Z X, Wang J G, Butterbach-Bahl K. Improving soil respiration while maintaining soil C stocks in Sunken plastic greenhouse vegetable production systems: Advantages of straw application and drip fertigation [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 316: 107464
- [3] 颜芳,王胜涛,刘彬,王维瑞,吴文强,赵跃. 设施菜田土壤磷素累积特征与风险调控方法[J]. 中国农学通报, 2019, 35(33): 111-115  
Yan F, Wang S T, Liu B, Wang W R, Wu W Q, Zhao Y. Soil phosphorus in facility vegetable field: Accumulation characteristics and risk control methods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(33): 111-115 (in Chinese)
- [4] 程泰鸿,吴吉,梁涛,谭庆军,戴安勇,陈新平,王孝忠. 重庆市露地蔬菜生产施肥现状与活性氮损失及温室气体排放估算[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1380-1390  
Cheng T H, Wu J, Liang T, Tan Q J, Dai A Y, Chen X P, Wang X Z. Assessment of fertilizer application and environmental cost from typical open-field vegetable production in Chongqing City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1380-1390 (in Chinese)
- [5] Tian J H, Rao S, Gao Y, Lu Y, Cai K Z. Wheat straw biochar amendment suppresses tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*: Potential effects of rhizosphere organic acids and amino acids[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(9): 2450-2462
- [6] Guan X L, Liu C Y, Li Y, Wang X Z, Liu Y M, Zou C Q, Chen X P, Zhang W. Reducing the environmental risks related to phosphorus surplus resulting from greenhouse cucumber production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 332: 130076
- [7] 贾萌萌,刘国明,黄标. 设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响:以江苏省水耕人为土和潮湿雏形土为例[J]. 土壤, 2021, 53(1): 30-36  
Jia M M, Liu G M, Huang B. Effects of greenhouse vegetable cultivation on fractionations and bioavailability of soil phosphorus: A case study on paddy soil and fluvo-aquic soil in Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 30-36 (in Chinese)
- [8] 刘蕾,王凌,徐万强,张国印,赵欧亚,邵静,李珅. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 197-203  
Liu L, Wang L, Xu W Q, Zhang G Y, Zhao O Y, Gao J, Li P. Environmental threshold and prevention of soil phosphorus leaching in greenhouse soils[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(S1): 197-203 (in Chinese)
- [9] 张晓庆,王梓凡,参木友,白海花,塔娜. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30-41  
Zhang X Q, Wang Z F, Can M Y, Bai H H, Ta N. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(9): 30-41 (in Chinese)

- [10] Cui H X, Luo Y L, Chen J, Jin M, Li Y, Wang Z L. Straw return strategies to improve soil properties and crop productivity in a winter wheat-summer maize cropping system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 133: 126436
- [11] Dikgwathle S B, Chen Z D, Lal R, Zhang H L, Chen F. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144: 110-118
- [12] Guan S, Liu S J, Liu R Y, Zhang J J, Ren J, Cai H G, Lin X X. Soil organic carbon associated with aggregate-size and density fractions in a Mollisol amended with charred and uncharred maize straw[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(7): 1496-1507
- [13] 平怀香, 崔建宇, 陈硕, 魏露露, 陈清, 张德龙. 施肥对农田土壤碳氮磷化学计量特征及相关酶活变化的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 112-120
- Ping H X, Cui J Y, Chen S, Wei L L, Chen Q, Zhang D L. Effects of fertilization on the stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus and enzyme activities in agricultural system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 112-120 (in Chinese)
- [14] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749
- [15] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139-151
- [16] 万欣, 董元华, 王辉, 李建刚, 宋丽芬, 汪海燕. 番茄温室土壤碳氮磷的生态化学计量学特征及其与土壤酶活性的关系[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 281-285
- Wan X, Dong Y H, Wang H, Li J G, Song L F, Wang H Y. Eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in tomato greenhouse soil and its relationship with soil enzyme activity[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(10): 281-285 (in Chinese)
- [17] Shafiqat M N, Pierzynski G M. Long-term effects of tillage and manure applications on soil phosphorus fractions [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(9): 1084-1097
- [18] Sun Q, Hu Y J, Chen X B, Wei X M, Shen J L, Ge T D, Su Y R. Flooding and straw returning regulates the partitioning of soil phosphorus fractions and phoD-harboring bacterial community in paddy soils[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, 105(24): 9343-9357
- [19] Yuan J, Wang L, Wang S, Wang Y, Wang H, Chen H, Zhu W. The use of biologically based phosphorus fractions to evaluate soil P availability in reduced P-input paddy soils[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(3): 326-334
- [20] 哈丽哈什·依巴提, 李青军, 张炎. 梯度扩散薄膜技术在干旱区土壤中原位测定磷素的方法及其应用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 43-49
- Harlhx Y, Li Q J, Zhang Y. Method and application of situ-measuring soil phosphorus in arid area using diffusive gradients in thin film(DGT) [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 43-49 (in Chinese)
- [21] DeLuca T H, Glanville H C, Harris M, Emmett B A, Pingree M R A, de Sosa L L, Cerdá-Moreno C, Jones D L. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 110-119
- [22] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1606-1612
- Cai G, Hu Y J, Wang T T, Yuan H Z, Wang J R, Li Q Y, Ge T D, Wu J S. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1606-1612 (in Chinese)
- [23] Wang Y Z, Peng X Y, Whalen J K, Shi Y, Lu C Y, Huang B, Zhang X Y, Chen X. Can periodic phosphorus fertilizer applications reduce the risk of P loss? [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 124(2): 135-151
- [24] Idrachim K, Wang Q, Wang L, Zhang W W, Peng C, Zhang S X. Determining the optimum level of soil Olsen phosphorus and phosphorus fertilizer application for high phosphorus-use efficiency in *Zea Mays* L in black soil[J]. *Sustainability*, 2021, 13(11): 5983
- [25] Olsen S R, Watanabe F S, Cosper H R, Larson W E, Nelson L B. Residual phosphorus availability in long-time rotations on calcareous soils [J]. *Soil Science*, 1954, 78(2): 141-152
- [26] Thomas R L, Sheard R W, Moyer J R. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus, and potassium analysis of plant material using a single digestion[J]. *Agronomy Journal*, 1967, 59(3): 240-243
- [27] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329
- [28] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707
- [29] Turner B L. Variation in pH optima of hydrolytic enzyme activities in tropical rain forest soils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(19): 6485-6493
- [30] Yu X J, Chen Q, Shi W C, Gao Z, Sun X, Dong J J, Li J, Wang H T, Gao J G, Liu Z G, Zhang M. Interactions between phosphorus availability and microbes in a wheat-maize double cropping system: A reduced fertilization scheme [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(3): 840-854
- [31] 刘肖, 胡国庆, 何红波, 张旭东. 连年秸秆覆盖对玉米产量及土壤微生物残体碳积累的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 117-122
- Liu X, Hu G Q, He H B, Zhang X D. Effects of long-term maize stovers mulching on maize yield and microbial necromass carbon accumulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 117-122 (in Chinese)
- [32] 邓明位, 张思佳, 朱波, 李梦, 蒲玉琳. 猪厩肥和秸秆还田对紫色土有机碳组分及稳定性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(2): 205-211
- Deng M W, Zhang S J, Zhu B, Li M, Pu Y L. Effects of pig manure and corn residue on the organic carbon fractions and stability of purple soil[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, 39(2): 205-211 (in Chinese)
- [33] Luan H A, Yuan S, Gao W, Tang J W, Li R N, Zhang H Z, Huang S W. 10-Year fertilization alters soil C dynamics as indicated by amino sugar differentiation and oxidizable organic C pools in a greenhouse vegetable field of Tianjin, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 169: 104226
- [34] Xiao H, Cong X, Dungait J, Bol R, Wang X J, Wu W L, Meng F Q. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2018, 15(7): 1-27
- [35] Cao N, Zhi M L, Zhao W Q, Pang J Y, Hu W, Zhou Z G, Meng Y L. Straw retention combined with phosphorus fertilizer promotes soil

- phosphorus availability by enhancing soil P-related enzymes and the abundance of *phoC* and *phoD* genes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105390
- [36] Yang C D, Lu S G. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150325
- [37] 施骥, 栗杰. 秸秆还田对耕地棕壤 pH 值及速效养分的影响[J]. *农业开发与装备*, 2019(1): 128-129
- Shi J, Li J. Effects of straw returning on pH and available nutrients of brown soil in cultivated land [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2019(1): 128-129 (in Chinese)
- [38] 王彦丽, 范庭, 王旭东, 张育林, 李利敏, 郑洛钧, 刘雅茜. 长期磷肥不均投入下黄土高原土壤磷素有效性及与土壤性质关系分析[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 237-242, 250
- Wang Y L, Fan T, Wang X D, Zhang Y L, Li L M, Zheng M J, Liu Y X. Analysis of phosphorus availability and its relationship with soil properties in the loess plateau under long-term imbalanced phosphorus input[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 237-242, 250 (in Chinese)
- [39] Margenot A J, Sommer R, Mukalama J, Parikh S J. Biological P cycling is influenced by the form of P fertilizer in an Oxisol[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(8): 899-909
- [40] Cong P, Wang J, Li Y Y, Liu N, Dong J X, Pang H C, Zhang L, Gao Z J. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204(6): 104735
- [41] Ibrahim M M, Tong C X, Hu K, Zhou B Q, Xing S H, Mao Y L. Biochar-fertilizer interaction modifies N-sorption, enzyme activities and microbial functional abundance regulating nitrogen retention in rhizosphere soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140065
- [42] Menezes-Blackburn D, Bol R, Klumpp E, Missong A, Nischwitz V, Haygarth P M. Citric acid effect on the abundance, size and composition of water-dispersible soil colloids and its relationship to soil phosphorus desorption: A case study [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(3): 2436-2446

责任编辑：杨爱东



**第一作者简介：**魏露露, 博士研究生, 现就读于中国农业大学, 硕士期间获得硕博连读(学术型研究生)资格, 并分别获得博士学业一等和二等奖学金。学士毕业于淮北师范大学, 期间连续 4 年获得学校人民奖学金并获得优秀毕业生称号。研究方向为外源(不同稳定性)碳投入对土壤碳、磷转化的影响。先后参与课题组国家自然科学基金项目: 短期淹水与施用铵态氮促进土壤残留磷释放机制研究和高氮磷残留土壤修复与污染控制技术集成示范。并主要参与寿光功能肥料教授工作站工作, 探究有机肥部分替代无机肥对设施土壤磷素有效性的影响。博士期间以第一作者在 *Journal of Environmental Management* 上发表论文“A meta-analysis of arable soil phosphorus pools response to manure application as influenced by manure types, soil properties, and climate”。



**通讯作者简介：**崔建宇, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要从事农业废弃物资源化利用、作物营养与施肥、土壤测试、草坪与环境管理等方面的研究与推广。现任中国植物营养与肥料学会农化测试技术委员会副主任、中国自然资源学会农业资源利用专业委员会秘书长。参加国家重点研发项目、国家自然科学基金项目、横向课题等研究 20 余项; 发表 SCI/EI 论文、核心期刊论文等 50 余篇; 出版学术专著 5 部; 制定国家标准、地方标准 2 项。