

范秉元. 长期有机肥与无机肥配施对马铃薯-玉米田土壤养分、碳组分、微生物区系及作物产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 233-240.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.033

# 长期有机肥与无机肥配施对马铃薯-玉米田土壤养分、碳组分、微生物区系及作物产量的影响

范秉元

(河南农业职业学院, 河南郑州 450000)

**摘要:**为探明长期有机肥与无机肥配施对马铃薯-玉米田土壤养分、活性碳组分含量、微生物菌群区系结构及作物产量变化的影响,于2016—2021年,通过长期施肥定位试验,设不施肥(CK)、单施化肥(T1)、单施生物有机肥(T2)、单施羊粪(T3)、50%化肥+50%生物有机肥(T4)、50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田(T5)、50%化肥+50%羊粪(T6)、50%化肥+50%羊粪+秸秆还田(T7)共8个处理,测定土壤养分、活性碳组分含量、微生物群落生物量、作物产量,并分析它们间的关联性。结果表明,与不施肥相比,连续不同施肥处理6年,各施肥处理的土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量分别显著提高19.99%~73.28%、45.71%~102.05%、27.98%~60.90%、21.49%~46.95%。其中,T5处理土壤速效氮、速效磷、速效钾比其他施肥处理分别显著提高7.29%~44.41%、8.95%~38.37%、5.54%~25.72%,有机质含量比T1、T2、T3、T6处理分别显著提高20.95%、12.88%、16.71%、8.93%;与不施肥相比,不同施肥处理均提高了土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量,改变了土壤微生物群落区系结构。其中,T5处理的总有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳含量比其他处理分别显著提高5.57%~69.47%、8.27%~80.92%、18.71%~124.59%、16.60%~100.65%;T5处理的细菌生物量比其他处理提高1.99%~42.83%,显著高于除T7处理外的其他处理。T5处理的放线菌、革兰氏阳性菌生物量以及革兰氏阳性菌/阴性菌比值、细菌/真菌比值均显著最高,真菌生物量显著最低;T5处理的玉米、马铃薯产量比其他处理分别提高6.57%~248.99%、4.81%~311.98%。RDA分析表明,外源养分尤其是有机质含量的增加,有利于提高土壤细菌、放线菌、革兰氏阳性菌及阴性菌的代谢活性,而对土壤真菌代谢具有一定的抑制作用。综上所述,有机肥与无机肥配施能够改善土壤质量,提高有机碳组分含量以及作物产量。其中,50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田处理表现最优。

**关键词:**有机肥;无机肥;养分;有机碳;微生物;产量

**中图分类号:**S154.3;S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0233-08

近年来,施用化肥较大地提高了粮食增产的潜力,对粮食产量的贡献率可达30%~50%<sup>[1-2]</sup>。为了追求粮食高产,化肥用量逐年递增,而过度施肥不仅造成土壤板结、农业面源污染等<sup>[3-4]</sup>,还会造成土壤有机碳含量下降,导致土壤结构被破坏,土壤养分退化等<sup>[5-6]</sup>。土壤有机碳是农田生态系统中土壤养分循环和肥力供应的核心部分,在培肥土壤、提高土地生产力等方面发挥重要作用,是评价土壤质量的关键指标<sup>[7-9]</sup>。土壤有机碳含量的增减,与外源有机碳的输入及有机碳输出之间的动态平衡

密切相关<sup>[10]</sup>。农田生态系统土壤有机碳组分含量受人为活动(施肥、耕作、灌溉管理等)影响较大<sup>[11-12]</sup>。土壤活性有机碳组分中的颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量占土壤全碳含量比例很小,但易被土壤微生物、植物吸收利用,且对田间管理措施的变化响应迅速,能够反映土壤碳库的微小变化<sup>[13-15]</sup>。因此,研究长期不同施肥措施对土壤碳组分含量变化的影响,有利于了解土壤有机碳的变化规律,对农田土壤有机碳含量的提高具有重要指导意义。

随着农业集约化生产的兴起,施肥已经成为影响土壤有机碳含量的重要措施<sup>[16]</sup>。但不同施肥措施、肥料种类以及秸秆还田方式,对土壤有机碳组分含量的影响并不一致<sup>[17]</sup>。有研究表明,合理的施肥措施能够通过投入外源有机物或秸秆还田等,提高土壤有机碳含量<sup>[18]</sup>。也有研究表明,不合理的施

收稿日期:2022-08-31

基金项目:河南省软科学研究计划(编号:152400410641);河南省科技攻关项目(编号:172102110252)。

作者简介:范秉元(1982—),男,河南郸城人,硕士,讲师,研究方向为农业环境分析及土地利用等。E-mail: abing13838320518@126.com。

肥措施能够通过激发效应,降低土壤有机碳含量,改变有机碳组分含量及比例<sup>[19]</sup>。有机肥具有养分释放慢、时效长、绿色环保等特点<sup>[20]</sup>。有机肥的合理施入,不仅能够提高作物产量,减少土壤面源污染,还能够有效改善土壤理化性质,增加土壤有机碳含量<sup>[21-22]</sup>。土壤微生物是土壤中有机碳转化的主要驱动力,参与有机碳的转化、分解与合成过程,而有机碳是土壤微生物生命活动所需养分和能量的主要来源<sup>[23-24]</sup>。有研究表明,外源有机碳的摄入会增加土壤微生物的生物量,提高土壤微生物的活性<sup>[25-26]</sup>。

以往的研究大多局限于不同有机肥无机肥配施比例对土壤有机碳含量或土壤微生物群落的影响<sup>[27-29]</sup>。而关于化肥减量与不同种类有机肥和秸秆还田配施对土壤碳组分含量、微生物菌群区系结构及之间相关性影响的研究较少,且不同施肥制度对不同作物种植体系土壤有机碳含量及微生物的影响均不同。本研究通过长期化肥减量与羊粪、生物有机肥及秸秆还田配施,探究不同施肥模式下土壤养分、碳组分含量、微生物菌群区系结构及作物产量的变化规律,以期马铃薯—玉米田有机肥无机肥的合理配施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间与地点

试验于 2016 年 6 月至 2021 年 6 月进行。试验地点位于河南农业职业学院农业工程学院实训基地(114°03'E,34°76'N),海拔 53 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 14.2℃,年均降水量 650~700 mm,年均日照时长 23 600 h,无霜期 240 d。供试土壤为黄潮土。试验前 0~20 cm 表层土壤理化性状:速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 48.34、58.05、134.56 mg/kg,含有机质 8.35 g/kg, pH 值为 8.2。

### 1.2 试验材料

供试材料:马铃薯品种郑薯 6 号(郑州市蔬菜研究所提供),玉米品种郑单 958(河南省农业科学院粮食作物研究所提供);供试肥料:氮磷钾复混肥(N:P:K=12:6:7),生物有机肥(有效活菌数 $\geq 0.2$ 亿 CFU/g,有机质含量 $\geq 40\%$ ,河南宝融生物科技有限公司提供),羊粪(含有机质 25.46%、氮 0.78%、磷 0.57%、钾 0.44%)。

### 1.3 试验设计

试验设置 8 个处理,分别为不施肥(CK)、单施

化肥(T1)、单施生物有机肥(T2)、单施羊粪(T3)、50%化肥+50%生物有机肥(T4)、50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田(T5)、50%化肥+50%羊粪(T6)、50%化肥+50%羊粪+秸秆还田(T7),每个处理重复 3 次,共 24 个小区,全部随机区组排列。小区面积 6.0 m $\times$ 7.5 m,走道 0.8 m,保护行 5 m,马铃薯株行距 40 cm $\times$ 50 cm,玉米株行距 25 cm $\times$ 50 cm。单施化肥用量为 750 kg/hm<sup>2</sup>;单施生物有机肥用量为 1 200 kg/hm<sup>2</sup>;单施羊粪用量为 22 500 kg/hm<sup>2</sup>。秸秆还田处理中,马铃薯与玉米秸秆均全部直接粉碎旋耕还田;秸秆不还田处理通过人工移走。氮磷钾复混肥 2/3 作为基肥,1/3 作为追肥,其中马铃薯季在幼苗期追肥,玉米季在大喇叭口期追肥。马铃薯生育期为 3 月 10 日至 6 月 10 日,玉米生育期为 6 月 17 日至 9 月 25 日。田间管理措施与当地农民习惯一致。分别于 2017 年马铃薯收获期和 2021 年马铃薯收获期利用“S”形 5 点取样法采集 0~20 cm 土壤样品。样品分为 2 个部分保存:一部分自然阴干,用于土壤养分、碳组分含量的测定;一部分 -40℃ 保存,用于土壤微生物群落的测定。

### 1.4 测试项目及分析方法

土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量分别采用碱解扩散法、0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 法、NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法、重铬酸钾容量-外加热法测定<sup>[30]</sup>;土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量分别采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法、六偏磷酸钠分散法、蒸馏水浸提法、高锰酸钾氧化法、三氯甲烷熏蒸法测定<sup>[30]</sup>;土壤微生物群落结构采用磷脂脂肪酸法测定<sup>[31]</sup>;各小区处理玉米、马铃薯产量均全部称质量计算,折算单位为 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.5 数据处理

试验数据采用 WPS 2019 进行统计与计算,采用 DPS 9.50 进行方差分析与显著性检验,采用 Canoco 5.0 进行 RDA 分析与作图。

## 2 结果与分析

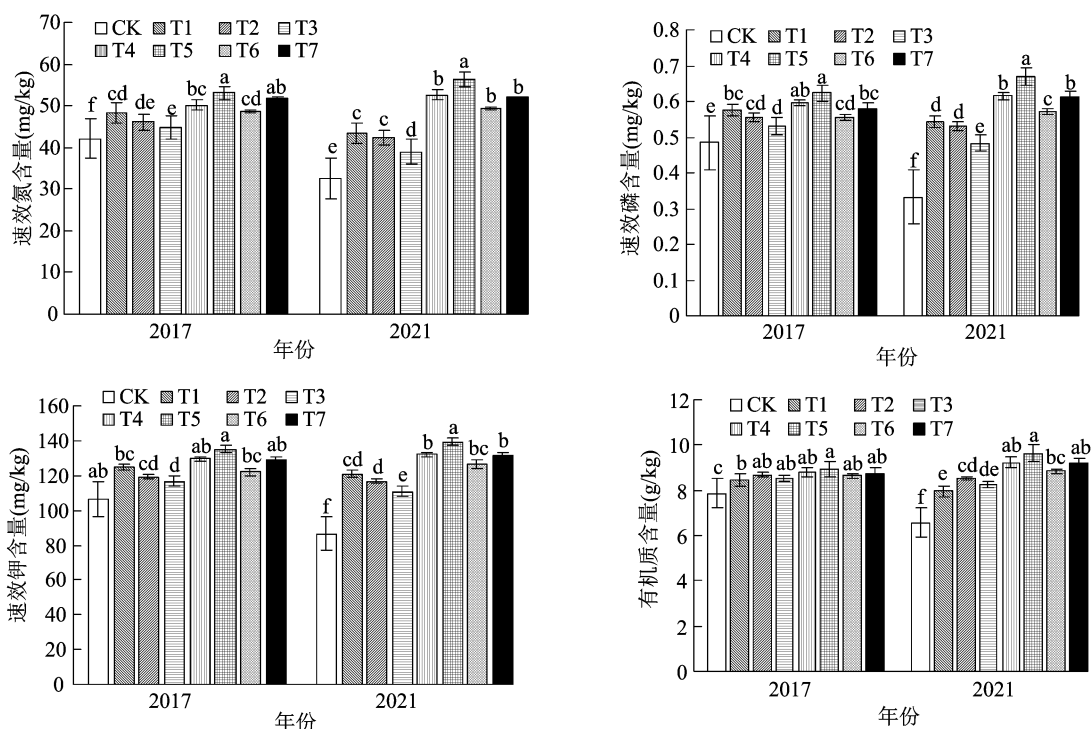
### 2.1 土壤养分含量变化

不同施肥年限下,各施肥处理的土壤速效养分及有机质含量差异较大(图 1)。2017 年(施肥 1 年)时,各施肥处理的土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量均显著高于 CK 处理( $P<0.05$ )。T5 处理的土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量均最

高,比其他施肥处理分别提高 2.41% ~ 18.95%、4.44% ~ 17.31%、4.28% ~ 15.70%、1.48% ~ 5.44%。其中,速效氮含量显著高于除 T7 外的其他处理;速效磷含量显著高于除 T4 外的其他处理;速效钾含量显著高于除 T4、T7 外的其他处理;有机质含量显著高于 T1 处理,而与其他施肥处理均无显著性差异。

随着施肥时间的延长,到 2021 年(施肥 6 年)时,不同处理土壤养分含量差异更加明显。其中,各施肥处理的土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量较 CK 处理分别显著提高 19.99% ~ 73.28%、

45.71% ~ 102.05%、27.98% ~ 60.90%、21.49% ~ 46.95%。T5 处理的土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量仍均最高。其中,速效氮、速效磷、速效钾比其他施肥处理分别显著提高 7.29% ~ 44.41%、8.95% ~ 38.67%、5.54% ~ 25.72%,有机质含量较 T1、T2、T3、T6 处理分别显著提高 20.95%、12.88%、16.71%、8.93%。T3 处理的速效氮、速效磷、速效钾含量显著低于其他施肥处理,T1 处理的有机质含量显著低于除 T3 外的其他施肥处理。



柱上不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。图 2 至图 7 同

图1 不同施肥处理对土壤养分含量变化的影响

## 2.2 土壤总有机碳含量变化

由图 2 可知,2017 年时,与 CK 处理相比,各施肥处理的土壤总有机碳含量显著提高 7.74% ~ 18.14%。其中,T5 处理总有机碳含量最高,比 T1、T3、T6 处理分别显著提高 9.65%、7.88%、5.53%。T1 处理总有机碳含量在所有施肥处理中最低,显著低于 T2、T4、T5、T7 处理。到 2021 年时,各处理的土壤总有机碳含量差异更加显著,与 2017 年相比,土壤总有机碳含量除 CK、T1 处理下降外,其他施用有机肥的处理均有不同程度的提高。2021 年各施肥处理的土壤总有机碳含量表现为 T5 > T7 > T4 >

T2 > T6 > T3 > T1 > CK。其中,T5 处理的总有机碳含量比其他处理显著提高 5.57% ~ 69.47%;CK 处理的总有机碳含量显著最低,而 T1 处理的总有机碳含量显著低于其他施肥处理。

## 2.3 土壤颗粒有机碳含量的变化

由图 3 可知,2017 年时,各施肥处理的颗粒有机碳含量均显著高于 CK 处理。其中,T5 处理的颗粒有机碳含量最高,比其他施肥处理显著提高 7.98% ~ 27.86%。T7 处理的颗粒有机碳含量比 T6 处理显著提高 8.80%,而与 T3 处理相比,无显著性差异。T1 处理的颗粒有机碳含量显著低于其他施

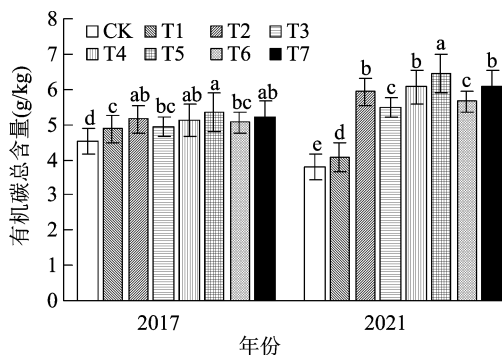


图2 不同施肥处理对土壤有机碳总含量变化的影响

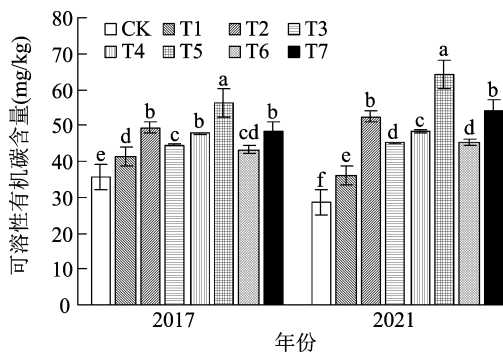


图4 不同施肥处理对土壤可溶性有机碳含量变化的影响

肥处理。到 2021 年时,各施肥处理的颗粒有机碳含量表现为  $T5 > T7 > T4 > T6 > T2 > T3 > T1 > CK$ 。其中,  $T5$  处理的颗粒有机碳含量比其他处理显著提高 8.27% ~ 80.92%, 与 2017 年相比, 差异更加显著。  $T7$  处理的颗粒有机碳含量显著高于  $T3$ 、 $T6$  处理,  $T2$ 、 $T3$  处理之间无显著差异。  $CK$  处理的颗粒有机碳含量显著最低, 而  $T1$  处理的颗粒有机碳含量显著低于其他施肥处理。

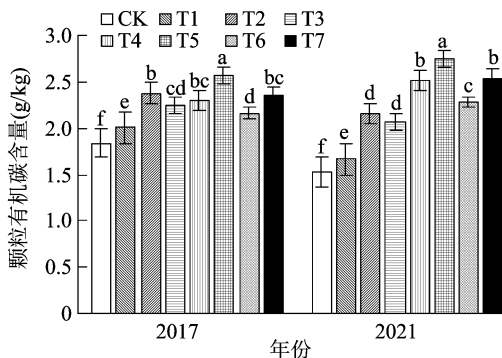


图3 不同施肥处理对土壤颗粒有机碳含量变化的影响

#### 2.4 土壤可溶性有机碳含量的变化

由图 4 可知, 2017 年时, 与  $CK$  处理相比, 各施肥处理土壤可溶性有机碳含量显著提高 16.20% ~ 58.11%。其中,  $T5$  处理的可溶性有机碳含量最高, 比其他施肥处理显著提高 14.36% ~ 36.07%。  $T2$  处理的可溶性有机碳含量比  $T1$ 、 $T3$  处理分别显著提高 18.99%、10.40%,  $T1$  处理的可溶性有机碳含量显著低于除  $T6$  外的其他施肥处理。到 2021 年时, 各施肥处理的可溶性有机碳含量表现为  $T5 > T7 > T2 > T4 > T6 > T3 > T1 > CK$ 。其中,  $T5$  处理的可溶性有机碳含量比其他处理显著提高 18.71% ~ 124.89%, 与 2017 年相比, 差异更加显著。  $T7$  处理的可溶性有机碳含量较  $T1$ 、 $T3$ 、 $T6$  处理分别显著提高 49.50%、19.77%、19.35%。  $T2$  处理的可溶性有机碳含量比  $T1$ 、 $T3$  处理显著提高 44.61%、15.85%。

#### 2.5 土壤易氧化有机碳含量的变化

由图 5 可知, 2017 年时, 与  $CK$  处理相比, 各施肥处理的土壤易氧化有机碳含量提高 3.95% ~ 35.03%。其中, 除  $T1$  处理外, 其他施肥处理的易氧化有机碳含量均显著提高。  $T5$  处理的易氧化有机碳含量最高, 比其他施肥处理提高 4.37% ~ 29.89%, 显著高于除  $T3$  外的其他施肥处理。  $T3$  处理的易氧化有机碳含量显著高于  $T1$ 、 $T2$ 、 $T4$ 、 $T6$  处理。随着施肥时间的延长, 到 2021 年时, 各施肥处理的易氧化有机碳含量表现为  $T5 > T7 = T2 > T4 > T3 > T6 > T1 > CK$ 。与 2017 年各处理相比, 单施或混施生物有机肥的  $T2$  (25.00%)、 $T4$  (28.43%)、 $T5$  (29.29%) 处理的易氧化有机碳含量的增长速率均高于单施或混施羊粪的  $T3$  (7.86%)、 $T6$  (13.78%)、 $T7$  (21.00%) 处理。2021 年  $T5$  处理的易氧化有机碳含量比其他处理显著提高 16.60% ~ 100.65%;  $T2$ 、 $T4$ 、 $T7$  处理间无显著性差异, 但均显著高于除  $T5$  外的其他施肥处理。

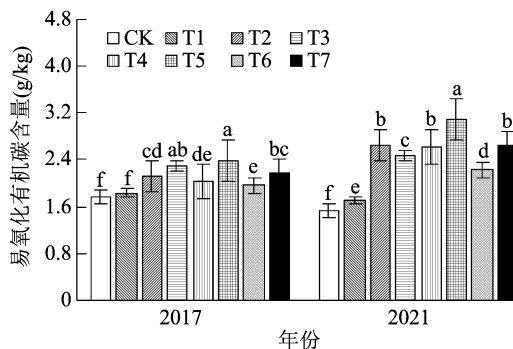


图5 不同施肥处理对土壤易氧化有机碳含量变化的影响

#### 2.6 土壤微生物量碳含量的变化

由图 6 可知, 2017 年时, 各施肥处理的土壤微生物量碳含量表现出不同的变化趋势, 与  $CK$  处理相比,  $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 、 $T5$ 、 $T7$  处理的微生物量碳含量分别显著提高 23.92%、6.23%、9.48%、27.85%、

16.80,T1 处理显著降低 8.95%。到 2021 年时,各施肥处理的微生物量碳含量表现为 T5 > T7 > T4 > T2 > T6 > T3 > CK > T1。与 2017 年各处理微生物量碳含量相比,CK、T1、T2、T3 处理的微生物量碳含量均不同程度地下降,而 T4、T5、T6、T7 处理均有所提高。其中,T5 处理的微生物量碳含量比其他处理显著提高 7.88%~53.10%。T7 处理的微生物量碳含量显著高于除 T5 外的其他处理,T2 与 T4 处理之间、T3 与 T6 处理之间均无显著性差异。T1 处理的微生物量碳含量显著低于其他处理。

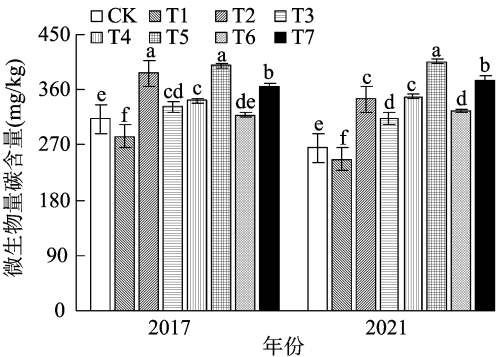


图6 不同施肥处理对土壤微生物量碳含量变化的影响

2.7 土壤微生物区系变化

不同施肥年限下,各施肥处理的土壤微生物区系菌群生物量差异较大(表 1)。2017 年时,与 CK

处理相比,各施肥处理的细菌生物量、革兰氏阳性菌生物量、革兰氏阴性菌生物量、细菌/真菌比值均不同程度地提高,而放线菌生物量、真菌生物量、革兰氏阳性菌/阴性菌比值均表现出不同的变化趋势。其中,T5 处理的放线菌生物量、革兰氏阳性菌生物量、革兰氏阳性菌/阴性菌比值、细菌/真菌比值均最高,比其他处理分别提高 3.03%~17.21%、4.26%~25.70%、8.57%~28.81%、2.83%~25.29%,真菌生物量显著最低。T7 处理的细菌生物量比 T1、T2 处理分别显著提高 8.08%、5.71%。T3 处理的革兰氏阴性菌生物量比其他处理提高 3.77%~16.31%,显著高于除 T7 外的其他处理。

到 2021 年时,各施肥处理的土壤微生物区系菌群生物量与 2017 年相比差异明显。其中,T5 处理的细菌生物量比其他处理分别提高 1.99%~42.83%,显著高于除 T7 外的其他处理。T5 处理的放线菌生物量、革兰氏阳性菌生物量、革兰氏阳性菌/阴性菌比值、细菌/真菌比值均显著最高,真菌生物量显著最低。T7 处理的革兰氏阴性菌生物量比其他处理提高 2.16%~25.91%,显著高于除 T5 外的其他处理。T1 处理的细菌生物量、革兰氏阳性菌生物量、革兰氏阴性菌生物量、放线菌生物量、革兰氏阳性菌/阴性菌比值、细菌/真菌比值均显著最低。

表 1 不同施肥处理对土壤微生物菌群生物量变化的影响

年份	处理	细菌生物量 (nmol/L)	革兰氏阳性菌 生物量(nmol/L)	革兰氏阴性菌 生物量(nmol/L)	革兰氏阳性/阴性 菌比值	放线菌生物量 (nmol/L)	真菌生物量 (nmol/L)	细菌/真菌比值
2017	CK	5.45 ± 0.26c	2.14 ± 0.22d	3.31 ± 0.14c	0.65 ± 0.02c	6.18 ± 0.26e	6.29 ± 0.22abc	0.87 ± 0.06e
	T1	5.82 ± 0.34b	2.17 ± 0.15d	3.65 ± 0.16b	0.59 ± 0.04d	6.10 ± 0.18e	6.34 ± 0.16ab	0.92 ± 0.05d
	T2	5.95 ± 0.15b	2.46 ± 0.20b	3.49 ± 0.15b	0.70 ± 0.06b	6.67 ± 0.35bc	5.92 ± 0.12de	1.01 ± 0.09bc
	T3	6.13 ± 0.19ab	2.28 ± 0.13c	3.85 ± 0.21a	0.59 ± 0.05d	6.32 ± 0.09de	6.59 ± 0.32a	0.93 ± 0.05d
	T4	6.10 ± 0.22ab	2.46 ± 0.14b	3.64 ± 0.16b	0.68 ± 0.03bc	6.85 ± 0.06ab	6.01 ± 0.20cd	1.01 ± 0.04bc
	T5	6.24 ± 0.17a	2.69 ± 0.10a	3.55 ± 0.09b	0.76 ± 0.06a	7.15 ± 0.15a	5.70 ± 0.24e	1.09 ± 0.06a
	T6	6.14 ± 0.16ab	2.49 ± 0.29b	3.65 ± 0.26b	0.68 ± 0.04bc	6.52 ± 0.29cd	6.18 ± 0.26bcd	0.99 ± 0.08c
	T7	6.29 ± 0.09a	2.58 ± 0.14ab	3.71 ± 0.34ab	0.70 ± 0.04b	6.94 ± 0.31ab	5.96 ± 0.39de	1.06 ± 0.05ab
2021	CK	5.16 ± 0.17e	1.94 ± 0.15f	3.22 ± 0.22e	0.60 ± 0.06d	5.92 ± 0.40f	6.18 ± 0.15b	0.83 ± 0.05e
	T1	4.67 ± 0.42f	1.66 ± 0.11g	3.01 ± 0.19f	0.55 ± 0.05e	5.24 ± 0.15g	6.62 ± 0.23a	0.71 ± 0.06f
	T2	6.28 ± 0.28b	2.69 ± 0.14b	3.59 ± 0.12bc	0.75 ± 0.07b	7.15 ± 0.17cd	5.44 ± 0.35d	1.15 ± 0.05c
	T3	5.64 ± 0.29d	2.15 ± 0.17e	3.49 ± 0.09cd	0.62 ± 0.02d	6.67 ± 0.24e	6.89 ± 0.12a	0.82 ± 0.07e
	T4	5.95 ± 0.15c	2.54 ± 0.20c	3.41 ± 0.20d	0.74 ± 0.04b	7.49 ± 0.20bc	5.72 ± 0.19c	1.04 ± 0.06d
	T5	6.67 ± 0.18a	2.96 ± 0.25a	3.71 ± 0.12ab	0.80 ± 0.06a	7.92 ± 0.30a	5.13 ± 0.29e	1.30 ± 0.02a
	T6	5.89 ± 0.09cd	2.40 ± 0.07d	3.49 ± 0.25cd	0.69 ± 0.04c	7.10 ± 0.54d	5.87 ± 0.24c	1.00 ± 0.09d
	T7	6.54 ± 0.21ab	2.75 ± 0.09b	3.79 ± 0.17a	0.73 ± 0.05b	7.52 ± 0.14b	5.42 ± 0.19d	1.21 ± 0.06b

## 2.8 作物产量变化

由图 7 可知,2017 年时,与 CK 处理相比,各施肥处理的玉米、马铃薯产量均显著提高。其中,T5 处理的玉米、马铃薯产量均最高,比其他处理分别提高 3.84%~30.62%、3.60%~23.17%。T1 处理的玉米、马铃薯产量均高于 T2、T3 处理;其中,玉米产量显著高于 T3 处理,马铃薯产量显著高于 T2、T3 处理。而 T4 与 T5 处理之间、T6 与 T7 处理之间的玉米、马铃薯产量均无显著性差异。

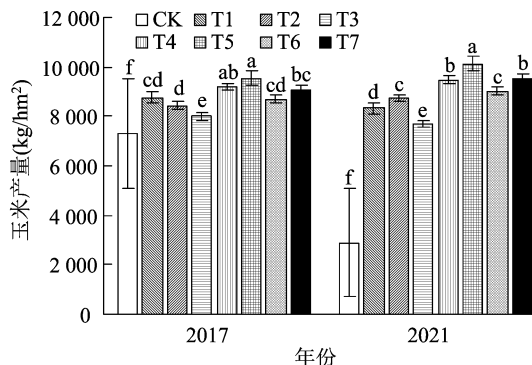
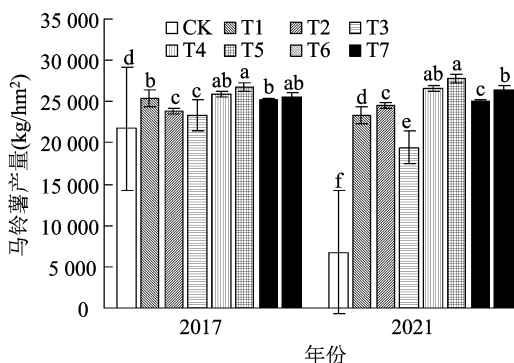


图7 不同施肥处理对玉米、马铃薯产量的影响

到 2021 年时,CK 处理的玉米、马铃薯产量下降明显,比 2017 年 CK 处理分别下降 60.30%、68.96%。T1、T3 处理的玉米、马铃薯产量和 T6 处理的马铃薯产量也均不同程度地下降,但下降幅度远低于 CK 处理。其他施肥处理的玉米、马铃薯产量均有不同程度地提高。在所有施肥处理中,T5 处理的玉米、马铃薯产量均最高,比其他处理分别提高 6.57%~248.99%、4.81%~311.98%。T3 处理的玉米、马铃薯产量均显著低于其他施肥处理。



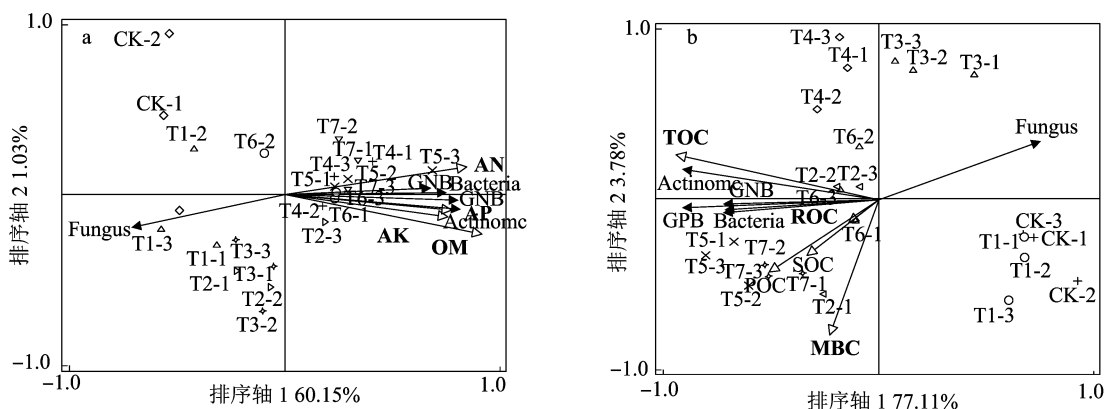
## 2.9 土壤微生物区系与土壤养分、碳组分含量的多元分析

为进一步分析不同年限下各施肥处理对土壤微生物群落变化的影响,通过土壤微生物菌群生物量与土壤养分、碳组分含量的 RDA 分析,进一步探讨它们之间的关联性。由图 8-a 可知,第 1 排序轴 (60.15%)、第 2 排序轴 (1.03%) 能够在累积变量 61.18% 水平上,解释不同施肥措施条件下土壤微生物群落与土壤养分含量间的相互关系。各处理点空间位置较为分散,说明不同施肥措施条件能够一定程度地影响土壤微生物群落的构成。土壤速效磷、速效钾、速效氮、有机质含量与土壤细菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌生物量呈正相关关系,与土壤真菌生物量呈负相关关系。其中,土壤有机质含量 (50.5%) 是主要驱动因子。图 8-b 结果显示,第 1 排序轴 (77.11%)、第 2 排序轴 (3.78%) 能够在累积变量 80.89% 的水平上,解释不同施肥措施条件下土壤微生物群落与土壤碳组分含量间的相互关系。土壤总有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量与土壤细菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌生物量呈正相关关系,与土壤真菌生物量呈负相关关系。其中,土壤总有机碳含量 (69.0%) 是主要驱

动因子。说明外源养分尤其是有机质含量的增加,有利于提高土壤细菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌的代谢活性,而对土壤真菌代谢具有一定的抑制作用。

## 3 讨论与结论

施肥方法及措施不同,会对农田土壤养分含量和土地生产力产生较大的影响。有研究表明,长期配施有机肥与无机肥,有利于基础土壤地力的提高;而长期施用单一肥料或不施肥,会导致土壤地力显著下降<sup>[32-34]</sup>。本研究表明,与不施肥或施用单一肥料相比,施肥 6 年后,有机肥与无机肥配施能够提高土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量以及作物产量,这与多数研究结果<sup>[35-36]</sup>较为一致。50% 化肥 + 50% 生物有机肥 + 秸秆还田处理,土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量以及玉米、马铃薯产量均高于其他有机肥与无机肥配施处理;其中,与 50% 化肥 + 50% 生物有机肥处理之间存在差异性,可能是由于秸秆还田添加了碳源的种类,提高了土壤微生物代谢的活性,进而促进土壤养分的转化与分解,从而被作物更好地吸收及利用;而与 50% 化肥 + 50% 羊粪 + 秸秆还田处理之间存在差异性,可能是因为生物有机肥的养分释放效率优于羊



图中 AN、AP、AK、OM 表示速效氮、速效磷、速效钾、有机质; Bacteria、GPB、GNB、Actinom、Fungus 表示细菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、放线菌、真菌; TOC、POC、ROC、SOC、MBC 表示总有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳。CK1-3 表示 CK 处理的 3 个重复, 以此类推

图8 不同施肥年限下土壤微生物菌群生物量与土壤理化性状、碳组分之间的 RDA 分析

粪,也可能是因为生物有机肥分解后,能够更好地被土壤微生物吸收利用,从而提高土壤养分含量及作物产量。

不同活性有机碳组分在土壤结构组成中具有不同的特征与功能<sup>[16]</sup>。有研究表明,施肥能够增加土壤活性有机碳的含量<sup>[37-38]</sup>。本研究表明,与不施肥相比,不同施肥处理均能够提高土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳的含量,这与王鹏等的研究<sup>[39]</sup>一致。其中,50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田处理,其土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳的含量均最高,50%化肥+50%羊粪+秸秆还田处理次之。分析认为,外援有机物的摄入能够增加土壤有机碳含量;而长期施用化肥会导致土壤酸化,土壤生物肥力下降,微生物活性降低,使土壤有机碳的分解与转化速率降低,从而减少有机碳含量的累积。而秸秆还田措施能够使植物残留分解补充土壤的有机碳含量,丰富的碳源可供土壤微生物吸收利用,提高微生物数量与活性,并在其作用下释放出更多的有机碳。

土壤微生物能够分解土壤有机碳并获取碳源,用于自身生命活动需求,是土壤微生物生命活动的主要能量来源,对土壤肥力的保持具有重要意义<sup>[40]</sup>。而有研究表明,施肥能够改变土壤微生物的菌群区系结构<sup>[27]</sup>。本研究结果表明,无机肥与有机肥配施,能够增加土壤微生物生物量,改变土壤微生物群落区系结构;施肥 6 年后,与其他处理相比,50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田处理,能够提高土壤细菌、革兰氏阳性菌、放线菌生物量,减少

真菌生物量。可见,在有机肥与无机肥配施条件下,细菌、革兰氏阳性菌、放线菌具有明显的竞争优势,真菌处于劣势。有研究表明,细菌更容易利用和分解有机碳,而细菌生物量的提高有利于促进有机碳的分解与转化,从而形成良好的物质与能量循环<sup>[41]</sup>。相关性分析表明,土壤速效磷、速效钾、速效氮、有机质、土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量与土壤细菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌生物量间有良好的线性关系,其中土壤有机质含量(50.5%)、有机碳含量(69.0%)是主要驱动因子。可知,土壤微生物群落区系结构的变化受多种因素共同影响。

研究表明,与不施肥或单一种类施肥相比,长期进行有机肥与无机肥配施,能够提高土壤养分、活性碳组分含量,改变土壤微生物群落区系结构,并提高玉米、马铃薯产量;相关性分析表明,土壤微生物群落区系结构的变化受土壤养分、活性碳组分含量多种因素的共同影响;其中,50%化肥+50%生物有机肥+秸秆还田处理表现最优。

#### 参考文献:

- [1] 于跃跃,郭宁,闫实,等. 有机肥替代化肥对土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(3):148-154.
- [2] 闫湘,金继运,梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [3] Jin S Q, Zhou F. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(1): 50-58.
- [4] 董作珍. 水稻氮磷钾肥料长期施用效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [5] 闫雷,周丽婷,孟庆峰,等. 有机物料还田对黑土有机碳及其组

- 分的影响[J]. 东北农业大学学报,2020,51(5):40-46.
- [6] 韩晓增,邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.
- [7] 樊廷录,王淑英,周广业,等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学,2013,46(2):300-309.
- [8] Yang F, Tian J, Meersmans J, et al. Functional soil organic matter fractions in response to long-term fertilization in upland and paddy systems in South China[J]. Catena,2018,162:270-277.
- [9] 马南,陈智文,张清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):53-57.
- [10] 息伟峰,徐新朋,赵士诚,等. 长期施肥下三种旱作土壤有机碳含量及其矿化势比较研究[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(12):2094-2104.
- [11] 李景. 高碳氮投入农田生态系统土壤团聚体有机碳及微生物特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
- [12] 陈磊,郝小雨,马星竹,等. 黑土根际土壤有机碳及结构对长期施肥的响应[J]. 农业工程学报,2022,38(8):72-78.
- [13] 田慎重,张玉凤,边文范,等. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(2):185-192.
- [14] 高梦雨,江彤,韩晓日,等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2126-2135.
- [15] 袁姗姗,邹刚,胡润,等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):27-35.
- [16] 徐香菇,蔡岸冬,徐明岗,等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):753-760.
- [17] 向姣,王著峰,王玉刚,等. 长期不同施肥对新疆荒漠农田土壤碳含量及其剖面分布的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(4):333-341.
- [18] 徐文静,张宇亭,魏勇,等. 长期施肥对稻麦轮作紫色土有机碳组分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(2):292-299.
- [19] 何伟. 不同施肥模式和盐渍化程度潮土中秸秆转化及其激发效应[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
- [20] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报,2016,25(1):175-181.
- [21] 张久明,匡恩俊,刘亦丹,等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(12):1534-1540.
- [22] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(12):2336-2347.
- [23] 傅敏,郝敏敏,胡恒宇,等. 土壤有机碳和微生物群落结构对多年不同耕作方式与秸秆还田的响应[J]. 应用生态学报,2019,30(9):3183-3194.
- [24] 程淑兰,方华军,徐梦,等. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报,2018,38(23):8285-8295.
- [25] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review[J]. Biology and Fertility of Soils,2008,45(2):115-131.
- [26] 李倩,马琨,冶秀香,等. 不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(12):1866-1875.
- [27] 杨旭,刘海林,黄艳艳,等. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(4):619-629.
- [28] 查燕,武雪萍,张会民,等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4649-4659.
- [29] 陈安强,付斌,鲁耀,等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报,2015,31(21):160-167.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [31] 孙和泰,华伟,祁建民,等. 利用磷脂脂肪酸(PLFAs)生物标记法分析人工湿地根际土壤微生物多样性[J]. 环境工程,2020,38(11):103-109.
- [32] 廖育林,鲁艳红,聂军,等. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1249-1258.
- [33] 鲁艳红,廖育林,周兴,等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. 土壤学报,2015,52(3):597-606.
- [34] 张伟彬. 不同比例化肥与有机肥配施对土壤碳组分及微生物碳代谢的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(15):188-195.
- [35] 李炳韵,程云飞,唐浩真,等. 配施生物有机肥与无机肥对连作菠萝土壤的影响[J]. 热带生物学报,2021,12(2):192-201.
- [36] 何进勤,雷金银,桂林国,等. 不同氮水平及生物有机肥对旱地土壤养分和马铃薯产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(10):191-196.
- [37] 林仕芳,王小利,段建军,等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学,2022,43(4):2219-2225.
- [38] 张瑞,张贵龙,姬艳艳,等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学,2013,34(1):277-282.
- [39] 王鹏,郑学博,梁洪波,等. 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳组分和酶活性的影响[J]. 华北农学报,2021,36(1):187-196.
- [40] 王利彦,周国娜,朱新玉,等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报,2021,41(7):2709-2718.
- [41] Wei M, Hu G Q, Wang H, et al. 35 years of manure and chemical fertilizer application alters soil microbial community composition in a fluvo-aquic soil in Northern China[J]. European Journal of Soil Biology,2017,82:27-34.