◆健康保育与环境修复◆

有机水溶肥通过有机碳用量调控玉米生长状况的研究

邓汪览，冯　固，陈王尊

（中国农业大学 资源与环境学院，北京　100193）

［摘　要］在合适的土壤供磷强度下（10～20 mg/kg），以玉米为供试植物，选用9种不同类型的有机水溶肥以及5个碳用量梯度（0、RC（厂家推荐用量）、60、240、600 mg），分析相同类型有机水溶肥在不同碳用量梯度条件下及不同类型有机水溶肥在相同碳用量条件下玉米生长状况、土壤有效磷含量的变化情况。结果表明：不同碳用量处理对玉米生长均存在促生效应，提高了土壤有效磷含量，改善了玉米氮磷钾营养状况，促进了植物生长。不同类型有机水溶肥在相同碳用量条件下尽管施入土壤的氮磷元素量不同，但对玉米促生作用不存在显著差异，表明有机水溶肥发挥肥效的主要成分并非氮磷元素，而是水溶性有机碳；不同类型有机水溶肥在相同碳用量条件下对土壤磷有效性的影响存在显著差异，表明水溶性有机碳类型影响土壤磷素转化过程。相同类型有机水溶肥在不同碳用量条件下对玉米促生作用存在显著差异，随土壤碳用量升高表现为先增强后不变的趋势，有机碳施用量为土壤有效磷含量的2倍时效果最佳。

［关键词］有机水溶肥；土壤有效磷；水溶性有机碳

［中图分类号］S147.2　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）02-0105-08

The dosage effect of organic carbon in organic water-soluble fertilizer on regulating the growth status of maize

DENG Wanglan, FENG Gu, CHEN Wangzun

(*College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*)

Abstract: Under suitable soil phosphorus supply intensity (10-20 mg/kg), 9 different types of organic water-soluble fertilizers and 5 carbon dosage gradients (0, RC (manufacturer's recommended dosage), 60, 240, 600 mg) are selected, the changes of maize growth status and soil available phosphorus content with the same organic water-soluble fertilizer under different carbon dosage gradient conditions and different types of organic water-soluble fertilizer under same carbon dosage gradient conditions are analyzed. The results show that different carbon dosages has a growth-promoting effect on maize growth, increasing soil available phosphorus content, improving maize nitrogen, phosphorus and potassium nutrient status, and promoting plant growth. There is no significant difference in the growth promotion effect of different types of organic water-soluble fertilizers on maize under the same carbon dosage conditions, although the nitrogen and phosphorus content applied to the soil is different, indicating that the main components of organic water-soluble fertilizer are not nitrogen and phosphorus, but water-soluble organic carbon. There are significant differences in the effects of different types of organic water-soluble fertilizers on soil phosphorus availability under the same carbon dosage, indicating that the types of water-soluble organic carbon affects the soil phosphorus conversion process. With the increase of soil carbon dosage, the growth promotion effect on maize shows a trend of first increasing and then unchanged, and the best effect is achieved when the organic carbon application rate is 2 times of the soil available phosphorus content.

Key words: organic water-soluble fertilizer; soil available phosphorus; water-soluble organic carbon

有机水溶肥通常是指由有机物料经发酵处理或化学降解等途径生产的水溶性肥料，可以在水中完全溶解且可直接被植物叶面或根部吸收利用[1]。作为一种新型肥料，有机水溶肥养分丰富、原材料多样、施用方便，且具有全水溶性、环境友好、成本低廉等特点，与传统化肥相比具有提高养分利用效率、减少养分损失、节水节肥等方面的优势[2-3]。我国有机废弃物资源丰富，农业农村部调查数据显

［收稿日期］2024-03-28

［作者简介］邓汪览(1999-)，男，江西吉安人，在读硕士研究生，主要从事盐碱土治理。

［通信作者］陈王尊。

［基金项目］科技部“十四五”重点研发计划：环渤海盐碱地耕地质量与产能提升技术模式及应用项目(2021YFD1900901)

示，我国每年产生大量的农田秸秆、食品工业的固体和液体废弃物约50万t[4]，这些有机废弃物一般经过发酵处理制成有机水溶肥产品以实现资源的综合利用，为我国有机水溶肥产业发展提供了充分保障。根据农业农村部种植业司肥料登记网站的统计，目前登记的有机水溶肥产品有3大类共900种产品，涉及800多家企业，但不同有机水溶肥厂家推荐用量不同，且施用量与施用方式没有统一标准。有机水溶肥的用量效应尚缺乏研究，厂家推荐用量是否合理？能否显著提升土壤养分有效性、改善农作物营养并促进农作物生长？合理有效的施用有机水溶肥，对于提升土壤生态系统的养分循环功能、节约养分资源和促进农作物生长具有十分重要的意义。

水溶性有机质是有机水溶肥发挥肥效的主要物质，通过有机碳刺激土壤微生物生长和分泌磷酸酶进而为植物提供有效磷，达到加快土壤磷素养分循环，促进农作物生长的目的。土壤微生物生物量是土壤有效性养分与植物养分间的枢纽，其既能作为植物速效养分的“源”，也能作为土壤长效养分的“库”[5-6]。土壤中大多数土著微生物因碳饥饿处于休眠状态，仅少部分处于活跃状态[7-8]。已有研究证明，向土壤中添加葡萄糖等低分子量的有机碳水化合物能显著扩大土壤微生物量磷库，加速土壤磷元素的生物周转[9]。PENG等[10]通过试验证明了长期施用有机肥或者秸秆还田均提高了酸性红壤、塿土和灰漠土的微生物量磷含量。ZHANG等[11]向土壤中添加果糖或葡萄糖等水溶性有机物能够提高土壤中具有解磷功能的糖化细菌门的丰度和磷酸酶活性，促进了土壤有机磷的活化利用。即有机物料的投入能够活化土壤微生物，扩大土壤微生物磷库，加快土壤磷循环，从而促进植物生长。前人在研究土壤肥力时通常关注于土壤养分而忽视了土壤土著微生物的作用。通过有机质活化土壤土著微生物，充分发挥土著微生物的解磷能力，加快微生物磷循环，同样是保持土壤肥力的关键途径。

有机质投入与土壤肥力及农作物的促生作用间并非呈线性关系，而是受到土壤碳磷比限制[12]。土壤碳磷比是反映土壤肥力的一个有效指标，同时也与土壤磷素有效性有着密不可分的关系[13-14]，它能够直观反映土壤肥力，可以极大程度决定植物和土壤微生物的养分有效性[15-16]。ZHANG等[17]的研究证明，降低土壤碳磷比能够扩大微生物生物量磷库，增强土壤磷素有效性及植物磷吸收能力。即，土壤碳磷比是衡量有机质投入量的核心指标。但，前人研究多集中于外源碳添加量对微生物群落变化的揭示，对于实际应用方面的研究鲜有报道，包括不同类型有机水溶肥施用方式及施用量等。研究有机水溶肥施用方式、施用量对土壤养分高效利用及有机水溶肥管理体系均具有重要意义。因此，本研究以玉米为供试农作物，采用室内盆栽试验研究5个碳用量梯度下9种有机水溶肥对土壤磷素有效性及对植物促生效应的影响，以期揭示有机水溶肥通过碳用量调控植物生长的用量效应，从而制定有机水溶肥施用规范，为有机水溶肥合理施用，提高农作物产量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于2021年9—11月在中国农业大学西校区温室开展，供试农作物为玉米（品种为郑单958），试验所用土壤采自北京市海淀区上庄镇白水洼村中国农业大学上庄实验站南区中心地里（平均海拔49.24 m），土壤类型为潮土，土壤基础理化性质见表1。土壤在采集后去除杂物，立刻粉碎晾干过筛（2 mm），然后加入磷酸一铵溶液将土壤有效磷质量分数调节至15 mg/kg，不再施用其他基肥，再次晾干后过筛（2 mm）、混匀装盆。盆钵的尺寸为17.5 cm×16.0 cm×13.0 cm，每盆装风干土2 kg。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil tested

容重/(g·cm^{-3})	pH	w(全氮)/(g·kg^{-1})	w(全磷)/(g·kg^{-1})	w(有机质)/(g·kg^{-1})	w(速效钾)/(mg·kg^{-1})	w(有效磷)/(mg·kg^{-1})
1.34	8.26	0.70	0.30	12.10	102.91	7.39

选取大小均一、籽粒饱满的玉米种子，用质量分数10%的过氧化氢消毒15 min后使用去离子水冲洗9～10遍，将种子铺在搪瓷盘中加水浸没种子，避光置于25 ℃的恒温培养箱中催芽，待露白2 mm后，于7月28日播种，8月2日出苗；出苗8 d以后间苗，留1株/盆；10月19日收获，共生长了53 d。植株培养期间室内温度始终保持在25～30 ℃以下，中途未补光。

1.2 试验设计

本试验在15 mg/kg土壤供磷强度下进行，按照土壤供磷强度的倍数（0、厂家推荐用量、2、8、20倍）进行了碳用量的换算。试验开始前，测定

了每种有机水溶肥的有机碳含量及氮含量。每666.7 m^2农田0～20 cm耕层土壤质量按150 000 kg计，计算了有机水溶肥厂家的推荐用量及各梯度碳施用总量。下文中水溶肥类型以其字母缩写表示，各水溶肥包装上推荐施用量为厂家推荐用量，下文中其对应的碳施用量以RC代表。

盆栽试验采用双因素随机区组设计，即有机水溶肥类型和有机水溶肥用量，选用9种有机水溶肥，设置5个碳用量梯度，每个处理重复3次，如下所示。9种不同类型有机水溶肥：甲壳素（JKS），鱼蛋白（YDB），聚谷氨酸（JGAS，水剂），海藻精（HZJF，粉剂），海藻精（HZJS，水剂），腐植酸（FZJ，粉剂），双藻糖肽（SZTT，粉剂），糖蜜（TM），葡萄糖（PTT，葡萄糖为化学纯试剂，无厂家推荐用量，仅作为其他有机水溶肥的对照，未参与方差分析与多重比较）。5种碳用量梯度：按照土壤供磷强度的0、RC、2、8、20倍进行梯度设计，每盆对应总施碳量分别为0、RC、60、240、600 mg。每种有机水溶肥单次施碳量为总量的1/3，分别为0、RC/3、20、80、200 mg，施用时将肥料溶于100 mL水中再浇到盆中，共施3次（出苗后15、25、35 d）。此外，试验中每隔5 d进行称量补水。

1.3　测定指标与方法

玉米株高生长动态测定：出苗后17、26、41、51 d使用卷尺测定株高。玉米地上部及地下部生物量的测定：收样时将玉米植株分为地上部和地下部。剪去植株地上部，洗净后用吸水纸擦干并吸净，使用天平准确称量并记录鲜质量，然后放入烘箱105 ℃杀青30 min，80 ℃烘干至恒质量，准确称量并记录。植株全氮、全磷及全钾含量测定：粉碎植株后，使用凯式定氮仪测定植株全氮含量，浓硫酸消煮植株样品后使用ICP-OES（Agilent Technologies，5110）测定植株全磷及全钾含量。采用$NaHCO_3$溶液浸提、钼锑抗比色测量土壤有效磷含量，采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量[18]。

1.4　数据处理与绘图

逻辑斯蒂生长模型的建立与不同处理间生长动态的差异性分析：玉米株高生长符合S型逻辑斯蒂增长曲线（荷兰生物数学家VERHULST为研究人口增长过程于1938年导出），使用1stOpt 5.0拟合逻辑斯蒂增长曲线。逻辑斯蒂方程表达式为：$y=\frac{a}{1-be^{cx}}$，其中a代表玉米最大株高，对该方程求二阶导数得$y''=\frac{kb^2ce^{cx}(be^{cx}+1)}{(1-be^{cx})^3}$，令该方程等于0，可得逻辑斯蒂方程的拐点（$\frac{\ln(-b)}{-c}$，$\frac{a}{2}$），横坐标表示玉米生长达到最大速率所对应的天数，继续求三阶导数可得$y'''=\frac{kbc^3e^{cx}(b^2e^{2cx}+4be^{cx}+1)}{(1-be^{cx})^4}$，令该方程为零可以求得玉米生长过程中的两个时间特征值$x_{1,2}=\frac{1}{c}\ln\frac{2\pm\sqrt{3}}{-b}$，$x_1$代表玉米从缓慢生长到快速生长的临界点，$x_2$则代表玉米从快速生长到缓慢生长的临界点，$x_2-x_1$代表玉米快速生长所持续的天数。

Graphpad Prism 9.0.2做方差分析和多重比较。在进行方差分析（ANOVA）前，对数据进行正态性检验（Kolmogorov-Smirnov，$P>0.05$）和方差齐性检验（Levene检验，$P>0.05$）。对不符合正态分布的数据进行对数变换，使其符合正态性假设。按照肥料类型和碳用量梯度两个因素对所有指标进行双因素方差分析，发现碳用量梯度对所有指标均存在显著性影响，而有机水溶肥类型仅对一部分指标存在显著影响，因此对其余部分指标按照单因素方差分析重新分析了碳用量梯度对这些指标的影响。最后选Turkey做多重比较，并使用Graphpad Prism 9.0.2软件进行绘图。数据使用Graphpad Prism 9.0.2和Excel 2010进行计算分析，用Graphpad Prism 9.0.2进行作图分析。

2　结果

2.1　方差分析结果

双因素方差分析结果见表2，单因素方差分析结果见表3。

由双因素方差分析表（表2）可知，碳用量梯度对玉米株高、地上部干质量、地上部鲜质量、根干质量、植株氮磷钾含量、土壤有效磷含量及土壤有机碳含量均有显著影响（$P<0.05$）；肥料类型对根干质量、植株氮磷钾含量、土壤有效磷含量及土壤有机碳含量有显著影响（$P<0.05$）；碳用量梯度和肥料类型的交互作用对植株氮磷钾含量、土壤有效磷及土壤有机碳含量均有显著影响（$P<0.05$）。

在玉米的不同生长时期，碳用量梯度对玉米株高均有显著影响（$P<0.05$），而肥料类型对玉米株高影响均不显著（$P<0.05$）。碳用量梯度在影响玉米地上部生长的同时对土壤有效磷含量及玉米根系的生长也有显著影响（$P<0.05$）；有机水溶肥类型对土壤有效磷、玉米根系、玉米氮磷钾含量均存在

表2　双因素方差分析结果

Table 2　Results of two-factor analysis of variance

试验因素	碳用量梯度		肥料类型		碳用量梯度*肥料类型	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
株高(2021-09-15)	39.91	< 0.000 1****	1.006	0.433 6	0.836 1	0.696 7
株高(2021-09-24)	9.619	< 0.000 1****	0.705 1	0.667 6	1.171	0.286 9
株高(2021-10-09)	8.751	< 0.000 1****	1.094	0.375	1.432	0.108 9
株高(2021-10-19)	7.752	< 0.000 1****	0.945 8	0.476 5	1.138	0.120 1
株高最大生长速率耗时/d	15.56	< 0.000 1****	0.773 1	0.614 6		
株高持续生长时间/d	6.333	0.000 9***	2.061	0.082 1		
地上部鲜质量/g	45.41	< 0.000 1****	0.388 8	0.906 4	1.135	0.322 7
地上部干质量/g	26.90	< 0.000 1****	0.382 3	0.910 2	1.099	0.360 9
根干质量/g	25.46	< 0.000 1****	2.368	0.029 9*	1.114	0.345 6
植株w(氮)/%	146.9	< 0.000 1****	83.41	< 0.000 1****	12.49	< 0.000 1****
植株w(磷)/%	109.6	< 0.000 1****	24.53	< 0.000 1****	14.01	< 0.000 1****
植株w(钾)/%	2.816	0.030 5*	5.25	< 0.000 1****	3.098	< 0.000 1****
土壤w(SOC)/%	8.401	< 0.000 1****	8.006	< 0.000 1****	9.034	< 0.000 1****
土壤w(有效磷)/(mg·kg^{-1})	346.1	< 0.000 1****	94.65	< 0.000 1****	62.53	< 0.000 1****

表3　单因素方差分析结果

Table 3　Results of one-way analysis of variance

检验方法	方差分析结果		Brown-Forsythe检验		Bartlett's检验	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
株高(2021-10-19)	7.524	< 0.000 1****	0.934 9	0.446 4	6.319	0.176 6
地上部鲜质量/g	43.93	< 0.000 1****	0.943 0	0.441 8	2.605	0.626 0
地上部干质量/g	25.69	< 0.000 1****	7.025	< 0.000 1****	54.7	< 0.000 1****
株高最大生长速率耗时/d	16.3	< 0.000 1****	2.275	0.080 8		
株高持续生长时间/d	5.224	0.002 1**	5.539	0.001 5**		

注:①表中数据为P值,P < 0.05表示显著效应;②先对所有数据进行了双因素反差分析,再对不符合双因素方差分析的数据进行了相应的单因素方差分析。

显著影响（P < 0.05），但对玉米地上部干质量、鲜质量和株高影响不显著（P > 0.05），表明在等碳用量的情况下，通过调整肥料类型能够影响土壤有效磷含量，调控玉米根系生长，间接促进玉米对土壤氮磷钾的吸收。碳用量梯度与玉米氮磷钾吸收量间F值大小为氮吸收量 > 磷吸收量 > 钾吸收量，说明碳用量梯度对植株氮磷吸收的影响程度远高于对植物钾含量的影响程度。

2.2　不同类型有机水溶肥用量差异对玉米生长动态及其生物量的影响

因等碳用量条件下有机水溶肥类型对玉米地上部干质量不存在显著影响，因此进一步将等碳用量条件下不同类型有机水溶肥作为重复，进行了不同碳用量梯度的单因素分析。

方差分析表明，碳用量对玉米株高、根干质量及玉米地上部干质量均存在显著影响（P < 0.05），施碳量为土壤有效磷的8倍及20倍时绝大部分肥料出现对应峰值。肥料类型对玉米株高及玉米地上部干质量影响不显著（P > 0.05），仅对根干质量有显著的促进作用（P < 0.05），聚谷氨酸类肥料对玉米根干质量的促进效果最为显著（见图1），对应的玉米根干质量增加了62.3%。

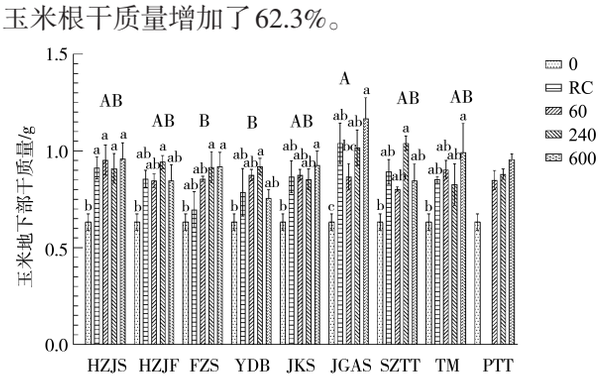

图1　不同类型有机水溶肥用量差异对玉米根干质量的影响

Fig. 1　Effects of different amounts of organic water-soluble fertilizer on dry mass of maize root

注:①小写字母代表不同碳用量梯度间的差异显著性,误差棒代表SE(n=3);②图中RC、2、8、20碳磷比对应总施碳量为30RC、60、240、600 mg/盆,分3次施用。

9种不同类型有机水溶肥处理的玉米株高生长随时间变化的动态均呈现S型曲线，用逻辑斯蒂模型相关参数进行了处理与绘图（见图2）。由图2结果表明，碳用量对玉米株高达到最大生长速率耗时及株高生长持续时间有显著影响（$P<0.05$），而肥料类型不存在显著影响（$P>0.05$）。随碳用量升高，株高达到最大生长速率耗时先降低后不变，株高持续生长时间先增加后不变，即：碳用量在0～2倍有效磷含量间时，碳投入能缩短玉米生长持续时间，加快玉米生长速率；碳用量在2～8倍有效磷含量间时，随碳用量升高，玉米促生效应增长不显著（$P>0.05$）；当碳用量高于8倍有效磷含量间时，即使碳投入再增加，也不会再促进玉米生长，甚至会对玉米促生效应产生抑制作用。

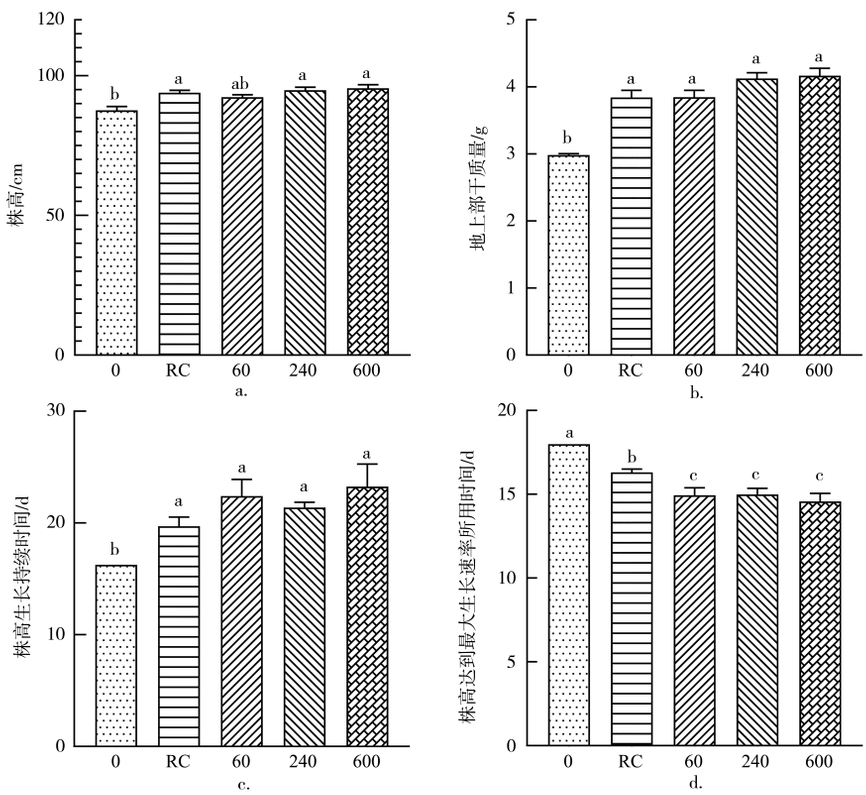

图2　不同类型有机水溶肥用量差异对玉米株高及地上部干质量的影响

Fig. 2　Effects of different amounts of organic water-soluble fertilizer on plant height and above-ground dry mass of maize

注：①小写字母代表不同碳水平之间的差异显著性，误差棒代表SE（n=27）；②因有机水溶肥类型之间没有差异，将同碳用量条件下的有机水溶肥类型视为重复，采用单因素方差分析重新分析并绘图。

2.3　不同类型有机水溶肥用量差异对玉米地上部氮磷钾吸收量的影响

试验结果表明，碳用量梯度对玉米氮吸收量、磷吸收量及钾吸收量均存在显著影响（$P<0.05$），碳用量为土壤有效磷含量的8倍及20倍时玉米氮磷钾吸收量效果最佳，而厂家推荐用量效果不稳定，与CK相比仅部分类型有机水溶肥存在显著差异性。

2.4　不同类型有机水溶肥用量差异对土壤有效磷含量的影响

不同类型有机水溶肥用量差异对土壤有效磷及玉米地上部氮磷钾吸收量的影响分别见图3、图4。由图3、图4可知，碳用量梯度对土壤有效磷含

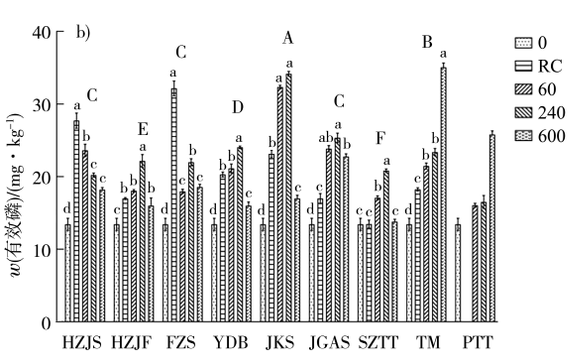

图3　不同类型有机水溶肥用量差异对土壤有效磷的影响

Fig. 3　Effect of different amounts of organic water-soluble fertilizer on available phosphorus in soil

注：小写字母代表不同碳水平之间的差异显著性，误差棒代表SE（n=3）。

量存在显著影响（$P<0.05$），土壤有效磷含量与碳用量梯度的关系表现为呈抛物线型变化趋势，碳用量为土壤有效磷含量8倍时大部分有机水溶肥对土壤有效磷的激发效应最强，碳用量过低或过高时对于土壤有效磷含量的激发效应均不稳定。与其他有机水溶肥不同的是，0～20倍土壤有效磷碳用量区间内，糖蜜及葡萄糖类有机水溶肥随碳用量升高对土壤有效磷的激发效应也随之增强。肥料类型对土壤有效磷含量同样存在显著影响（$P<0.05$），甲壳素类肥料对土壤有效磷激发效果最佳。

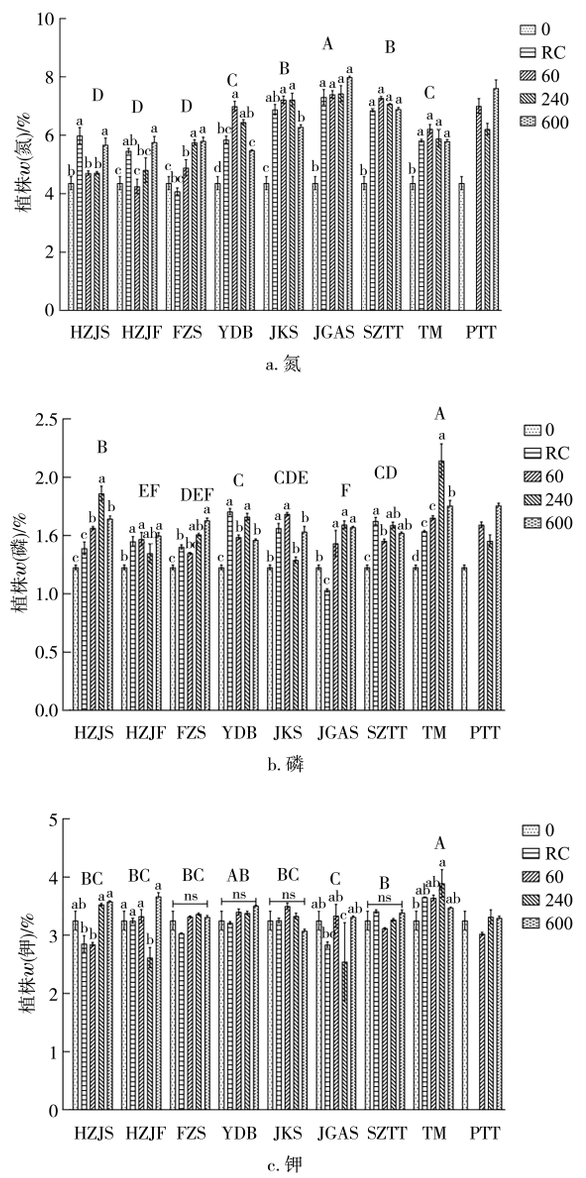

图4　不同类型有机水溶肥用量差异对玉米地上部氮磷钾吸收量的影响

Fig. 4　Effects of different amounts of organic water-soluble fertilizer on nitrogen, phosphorus and potassium absorption in the apper part of maize

3　讨论

3.1　有机水溶肥用量效应

土壤微生物生物量是反映土壤肥力的重要指标，能够反映土壤特性，对于土壤养分周转与物质循环至关重要[19-21]。向土壤添加有机物质能活化土壤微生物，促进土壤难溶性磷活化，提高植物磷吸收，是提升土壤肥力的重要途径[10]。ZHANG等[11]和WANG等[22]的研究表明，向土壤中添加外源果糖显著提高土壤糖化细菌属的丰度，同时提高土壤磷酸酶活性和有机磷的矿化并提高植物磷吸收。证明了外源碳投入能够活化土壤解磷微生物活性，激发土壤磷素有效性从而促进植物生长。本试验结果同样表明，通过调控外源碳添加量改变土壤碳磷比便能有效调控植物生长状况。随碳用量增加，有机水溶肥促生作用趋势先增强后不变，碳用量为土壤有效磷含量的2～8倍时，促进植物生长的作用效果最佳，而碳用量超过土壤有效磷含量的8倍后，即使碳用量再增加，也不能进一步促进植物生长。STEPHEN等[23]向培养皿中加入1%～5%的葡萄糖，发现随碳用量增加，微生溶磷能力呈先增加后降低的趋势，其结果表明碳添加量与土壤微生物解磷能力两者并非呈正相关趋势，而是呈抛物线趋势。此外，ZHANG等[17]和PENG等[24]同样发现，在磷限制条件下，碳施用剂量过高时，微生物生命活动及植株生长会受到抑制，这是由于过高的土壤碳磷比会导致微生物强烈竞争土壤生物有效性磷，反过来抑制植物生长。即，外源碳施用量能作为有机水溶肥施用的关键指标之一，按照土壤有效磷含量的2～8倍控制外源碳投入能达到最佳效果。

所用9种有机水溶肥促进植物氮吸收量、磷吸收量及钾吸收量的效应完全一致，表现为对植物氮磷含量影响极大，而对植物钾吸收影响较小。试验过程中，不同类型有机水溶肥由于成分不同，氮磷含量也并不相同，在等碳添加量条件下伴随加入土壤的氮磷元素含量差异极大；但结果表明不同类型有机水溶肥对于玉米地上部干鲜质量及玉米株高没有显著影响，表明有机水溶肥促进植物生长的过程中，其含有的氮磷元素并非主要影响因素，其包含的水溶性小分子有机碳才是促进植物生长的最主要因素，该结果与彭懿等人[24]研究结果相似。

3.2　有机水溶肥类型对植物生长的影响差异

前人研究主要集中于有机水溶肥施用方式及施用量等方面，极少有研究考虑有机水溶肥类型对植物生长的影响。探究等碳用量条件下不同有机碳小

分子间对植物生长及土壤的影响已成为近两年研究的热点问题[25-26]。本试验发现，肥料类型会导致土壤有效磷含量存在显著差异（$P<0.05$），表明不同类型碳源对于土壤难溶性磷素的活化能力存在差异。KHAN等[27]研究发现，微生物溶P效率与其分泌有机酸的能力有关，而有机酸的性质和数量因不同的碳源和微生物而异。根据NAUTIYAL等[28]的说法，与其他碳源相比，微生物以葡萄糖作为碳源时会释放更多有机酸，活化土壤难溶性磷素。由于可见，土著微生物对于不同类型碳源利用能力确实存在差异。此外，实验还发现，当微生物以甲壳素作为碳源时，对土壤有效磷的激发作用比葡萄糖更强，表明甲壳素对土壤微生物活性存在更为明显的激发效应。此前，李非里等[29]研究发现，甲壳素对微生物有着良好的吸附性能，能够保持微生物高的生物活性。姜成林等[30]早在1989年就发现放线菌对甲壳素类物质降解能力更强。董俊霞等[31]通过盆栽试验同样发现，甲壳素类肥料可以增加根际土壤中细菌、放线菌的数量，同时减少土壤真菌数量，减轻真菌病害。因此，甲壳素活化土壤有益微生物，抑制病害微生物，导致微生物分泌更多有机酸，可能是造成该现象的重要原因。

等碳条件下，有机水溶肥类型仅对植物氮磷吸收存在显著影响，但对于植株生长状况影响不大，因此有机水溶肥原材料可以选择相对廉价易得的原材料，该结果对于有机水溶肥生产利用存在一定指导意义。此外，本试验发现适量施用有机水溶肥能够促进植物根系生长，与其他8种类型有机水溶肥相比，聚谷氨酸类肥料对植物根系的促生效应最佳，表明聚谷氨酸类物质对于植物根系生长可能存在刺激作用，但具体机制仍需进一步探究。在之前的研究中，彭润润等[32]发现，γ-聚谷氨酸能作为促根剂，可以促进烟株根系发育，增加烟株干物质积累，且烟株生长发育较快，叶片大。此外，郑丽等[33]研究发现，适当施用磷肥同样能够促进植物根系的生长，表明土壤磷素有效性与植物根系生长密切相关，同样可能是该现象的重要支撑。

3.3　有机水溶肥施用规范

试验结果表明，有机水溶肥厂家推荐用量效果不佳，不同厂家推荐用量由于碳用量差异较大，效果不稳定，且施用方式也不尽相同，导致有机水溶肥市场较为混乱。建立有机水溶肥市场缺乏施用规范与配套管理措施对我国农业可持续发展实现意义重大，因此，在此对有机水溶肥施用规范做出了总结。有机水溶肥标准应遵循有机水溶肥行业推荐标准（NY/T 3831—2021），但在该标准中并未对有机水溶肥有机质含量作出规范，因此以市场默认有机水溶肥有机质含量为标准，有机水溶肥有机质含量不低于40%。施用方式方面，有机水溶肥肥效快，搭配滴灌技术肥料利用率更高，因此有机水溶肥更适合滴灌，少量多次分批施用效果最佳，按照农作物生长周期分3次施用完毕；施用量方面，在合适的土壤供磷强度下（10～20 mg/kg），不考虑成本的情况下按照土壤有效磷含量的8倍施用效果最佳，考虑成本的情况下按照土壤有效磷含量的2倍施用效果最佳。目前厂家推荐用量没有统一标准，效果不稳定，对于推荐用量过低的厂商，建议应适当增加推荐用量。

4　结论

9种有机水溶肥土施均能增强土壤解磷微生物活性（没有微生物指标），提高植物利用土壤磷的能力，增加植物氮磷吸收量，促进植物生长。外源碳投入量能作为衡量有机水溶肥促生效应的关键指标之一，随外源碳投入量升高，有机水溶肥作用效果趋势先增强后不变趋势。当外源碳投入量为土壤有效磷含量的2～8倍区间时，促进植物生长的作用效果最佳，外源碳投入量超过土壤有效磷含量的8倍后，即便再加大外源碳的投入量，也不能进一步促进植物生长。最后，结合试验结果对有机水溶肥施用规范进行了整理总结，有机水溶肥生产应符合有机水溶肥行业推荐标准（NY/T 3831—2021），其有机质质量分数不低于40%，结合滴灌技术分3次施用，施用间隔为10 d，施用量为土壤有效磷含量的2倍。

［参考文献］

［1］ 中华人民共和国农业农村部.有机水溶肥料通用要求：NY/T 3831—2021［S］.北京：中国农业出版社，2021.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Organic water-soluble fertilizers-General regulations：NY/T 3831—2021［S］. Beijing：China Agricalture Press，2021.

［2］ 曹小闯，李烨锋，吴龙龙，等.有机水溶肥对水稻干物质、氮素积累和转运的影响［J］.作物杂志，2020(5)：110-118.
CAO X C，LI Y F，WU L L，et al. Effects of Organic Soluble Fertilizer on the Accumulation and Translocation of Dry Matter and Nitrogen of Rice［J］. Crops，2020(5)：110-118.

［3］ 柯用春，曹明，杨小锋，等.不同浓度有机水溶肥对热带设施甜瓜产量和品质的影响［J］.新疆农业科学，2015，52(2)：217-221.
KE Y C，CAO M，YANG X F，et al. Effect of Different Concentrations of Water Soluble Organic Fertilizeron Yield and Quality of Tropical Facilities Cultivated Melon［J］. Xinjiang Agricultural Sciences，2015，52(2)：217-221.

[4] 朱奕庚,姚林晓,古冬冬,等.国内外秸秆打捆机械研究现状与展望[J].农机使用与维修,2023(2):31-34.
ZHU Y G, YAO L X, GU D D, et al. Research Status and Prospect of Straw Baling Machinery at Home and Abroad[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2023,(2):31-34.

[5] YEVDOKIMOV I, LARIONOVA A, BLAGODATSKAYA E. Microbial immobilisation of phosphorus in soils expos-ed to drying-rewetting and freeze-thawing cycles[J]. Biology and Fertility of Soils,2016,52(3):685-696.

[6] DAI Z M, LIU G F, CHEN H H, et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosyste-ms[J]. The ISME journal emultidisciplinary journal of microbial ecology,2020,14(3):757-770.

[7] GROFFMAN P M, FISK M C. Phosphate additions have no effect on microbial biomass and activity in a northern hardwood forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(12):2441-2449.

[8] DEMOLING F, FIGUEROA D, Baath E. Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(10):2485-2495.

[9] 何怡,高伟,诸海焘,等.秸秆添加对土壤微生物-根系形态介导的番茄磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):363-371.
HE Y, GAO W, ZHU H T, et al. Effects of straw addition on soil microbes-root morphology governing phosphorus-acquisition of Solanum lycopersicum[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(2): 363-371.

[10] PENG Y, DUAN Y, HUO W, et al. Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2021,57(5):657-669.

[11] ZHANG L, PENG Y, ZHOU J C, et al.Addition of fructose to the maize hyphosphere increases phosphatase activity by changing bacterial community structure[J]. Soil Biol Biochem, 2020, 142:107724.

[12] WEI X M, RAZAVI B S, HU Y J, et al. C/P stoichiometry of dying rice root defines the spatial distribution and dynamics of enzyme activities in root-detritusphere[J]. Biol Fertil Soils, 2019, 55:251-263.

[13] VITOUSEK P M, FARRINGTON H. Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory [J]. Biogeochemistry, 1997, 37(1):63-75.

[14] GE T, LUO Y, SINGH B P. Resource stoichiometric and fertility in soil[J]. Biol Fertil Soils, 2020, 56(8):1091-1092.

[15] 周然.石灰性土壤微生物生物量C/P比的影响因素[D].北京:中国农业大学,2005.
ZHOU R. Influential factors of microbial biomass C/P in calcareous soil[J]. Beijing: China Agricultural University, 2005.

[16] 林启美.土壤可溶性无机磷对微生物生物量磷测定的干扰[J].生态学报,2001(6):993-996.
LIN Q M. Interference of soil soluble inorganic P in measurement of soil microbial biomass P[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001 (6):993-996.

[17] ZHANG L, XU M G, LIU Y, et al. Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium[J]. New Phytol, 2016, 210(3):1022-1032.

[18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

[19] KHAN K S, MACK R, CASTILLO X. Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationshi-ps to the soil organic matter C/N/P/S ratios[J]. Geoderma, 2016, 271: 115-123.

[20] MANRAL V, BARGALI K, BARGALI S S, et al. Relationships between soil and microbial biomass properties and annual flux of nutrients in Central Himalaya forests, India[J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(12):2014-2025.

[21] GAO Y J, ZENG F J. Patterns of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three life-form desert plants and responses to soil and microbial biomass factors in a hyper-arid desert ecosystem[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2023, 30 (15):43962-43974.

[22] WANG G W, JIN Z X, WANG X X, et al. Simulated root exudates stimulate the abundance of Saccharimonadales to improve the alkaline phosphatase activity in maize rhizosphere [J]. Applied Soil Ecology, 2022, 170:104274.

[23] STEPHEN J, JISHA M S. Gluconic acid production as the principal mechanism of mineral phosphate solubilization by Burkholderia sp. (MTCC 8369)[J]. Journal of Tropical Agriculture, 2011, 49:99-103.

[24] PENG Y, DUAN Y, HUO W, et al. C: P stoichiometric imbalance between soil and microorganisms drives microbial phosphorus turnover in the rhizosphere[J]. Biol Fertil Soils, 2022, 58:421-433.

[25] WU Q H, ZHOU W L, LU Y L. et al. Combined Chemical Fertilizers with Molasses Increase Soil Stable Organic Phosphorus Mineralization in Sugarcane Seedling Stage[J]. Sugar Tech, 2023, 25:552-561.

[26] 李娜,滕培基,雷琬莹,等.外源有机物添加种类对农田黑土有机碳激发效应的影响及作用机理[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(10):1588-1601.
LI N, TENG P J, LEI W Y, et al. Effects and mechanisms of addition of different types of exogenous organic materialson priming effect of organic carbon in arable black soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(10): 1588-1601

[27] KHAN M S, ZAIDI A, AHEMAD M, et al. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2010, 56:73-98.

[28] NAUTIYAL C S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms[J]. FEMS Microbiol Lett, 1999 , 170(1):265-270.

[29] 李非里,盛礼俊,俞桂莲.甲壳素作为微生物载体在废水生化处理中的应用[J].浙江工业大学学报,2000,28(2):152-154.
LI F L, SHENG L J, YU G L, et al. Application of chitin as immobilized microorganisms supporter during wastewater biochemical treatment[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2000,28(2):152-154.

[30] 姜成林,徐丽华.云南高原湖泊放线菌区系及资源的研究[J].微生物学报,1989,29(1):7-14.
JIANG C L, XU L H. Studies on actinomycete flora and resources in the plateau lakes in Yunnan[J]. Acta Microbiologica Sinica, 1989,29(1):7-14.

(下转第122页)