

不同改良材料对灌漠土微生物量磷
及生物有效性的影响

谭雅茹,张育林,王旭东

(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过培养和盆栽试验,向灌漠土土壤中加入等量磷和不同添加比例的硫磺 S(0.05%、0.15%、0.45%)、生物菌肥 B(0.25%、0.50%、1.00%)、有机肥 OM(0.50%、1.00%、2.00%)和小麦秸秆 WS(1.00%、2.00%、4.00%),研究不同改良材料配施磷肥土壤微生物量磷的变化特征,及其与 Olsen P、小麦吸磷量之间的关系。结果表明,添加不同改良材料处理的土壤微生物量磷含量均显著高于对照(不添加改良材料),且随着添加比例的增大而增加。在第 16 天时,各处理土壤微生物量磷含量达到最大值,OM_{2.00}、B_{1.00}、WS_{4.00}和 S_{0.45}处理分别较对照显著增加了 34.66%、34.52%、28.19%和 23.89%;经过 30 d 的培养,硫磺、生物菌肥、有机肥和小麦秸秆处理的土壤微生物量磷含量较对照分别增加了 19.51%、43.08%、47.92%和 41.68%。在一定范围内(Olsen P 约 90 mg·kg⁻¹),土壤微生物量磷随土壤 Olsen P 提高而增加。在培养的第 16 天和第 30 天时,小麦植株吸磷量也与土壤微生物量磷存在极显著的相关关系。总体看来,有机肥或生物菌肥配合磷肥施用于灌漠土能促进土壤微生物量磷的增加,提高磷的生物有效性,对于灌漠土磷素高效利用具有重要意义。

关键词:微生物量磷;改良材料;小麦吸磷量;灌漠土;河西走廊

中图分类号:S156.4;S153.6⁺1 **文献标志码:**A

Effects of different improved soil supplements on microbial biomass
phosphorus and bioavailability in irrigated desert soil

TAN Yaru, ZHANG Yulin, WANG Xudong

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Lab of Plant Nutrition and
the Agri-environment in Northwestern China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With incubation and pot experiments, an irrigated desert soil was amended with equal amount of phosphorus (P), sulfur (0.05%, 0.15%, and 0.45%), biological fertilizer (0.25%, 0.50%, and 1.00%), organic fertilizer (0.50%, 1.00%, and 2.00%), and wheat straw (1.00%, 2.00%, and 4.00%). The purpose was to investigate the change patterns of soil microbial biomass P and Olsen P as well as their relationships with P uptake by wheat. The results showed that the content of soil microbial biomass P was significantly higher in the soil treated with different modified supplements than that with control (sole P application), and increased with increasing the proportion of addition. At 16 days, the soil microbial biomass P content reached the maximum value. Treatment OM_{2.00}, B_{1.00}, WS_{4.00}, and S_{0.45} increased by 34.66%, 34.52%, 28.19%, and 23.89%, respectively. When soil Olsen P was lower than 90 mg·kg⁻¹, soil microbial biomass P increased with the increase in soil Olsen P. At the 16th and 30th day of culture, the P uptake of wheat plants was also significantly correlated with soil microbial biomass P. In general, the application of P fertilizer combined with organic fertilizer or biological fertilizer promoted microbial biomass P, and improved the bioavailability of P. It is of great significance for the efficient utilization of P in irrigated desert soil.

Keywords: microbial biomass phosphorus; modified soil supplements; phosphorus uptake in wheat; irrigated desert soil; Hexi Corridor

土壤微生物参与土壤中 C、N、P、K 等元素的循环,对提高土壤养分有效性具有重要作用^[1]。微生物量磷是土壤中重要的活性磷源,能反映土壤磷素肥力水平^[2]。在某种意义上,微生物量磷所占比例越大,被土壤吸附固定的磷就越少,土壤磷活性越大^[3]。由于受一定程度盐渍化的影响,甘肃河西走廊地区土壤对水溶性磷的吸持和固定作用强烈,磷肥施用后,大部分速效磷被转化为溶解度低的 Ca-P 形态^[4],导致其磷肥当季利用率仅有 10%~20%^[5]。因此,提高土壤微生物磷量与提高河西地区盐渍化土壤磷素有效性密切相关。毛文娟等^[6]研究发现,施用硫磺粉能有效降低北方盐碱土土壤的碱度和交换性钠离子含量,改善了土壤物理结构,从而促进了盐碱土的改良。El-Sayed 等^[7]研究表明,生物菌肥通过微生物生命代谢活动,改善养分吸收状况可改善土壤理化性质,提高土壤微生物数量。吴立鹏等^[8]在滨海盐渍化土壤连续两年的定位试验表明,有机肥与磷肥合理配施能够通过外加碳源促进微生物生长繁殖,加强微生物对磷素形态的转化利用。郭成藏等^[9]对于长年连作棉田的研究发现,秸秆还田条件下土壤微生物量磷含量随着连作年限的延长呈逐渐增加的变化趋势。目前,国内外学者多从土壤结构、理化性质和土地利用方式等方面对土壤微生物生物量、微生物数量的影响进行研究,而关于不同改良材料作用下土壤微生物量磷含量变化及其与土壤 Olsen P、生物有效性之间关系的研究却较少。由此,本文针对河西走廊具有一定程度盐渍化的土壤,选择 4 种不同改良材料(硫磺、生物菌肥、有机肥和秸秆)进行培养试验和盆栽试验,研究了 4 种改良材料不同添加比例对土壤微生物量磷的影响,最终为盐渍土壤磷素高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样类型为灌漠土,2018 年 4 月采自甘肃省金昌市永昌县红山窑乡张家庄村(38°21′25″N, 101°37′20″E)农田,含盐量为 0.11%,属轻度盐渍化土^[10]。采样深度为土壤表层 0~20 cm,土壤的基本理化性质见表 1。供试材料分别是硫磺粉(分析纯,含 S 99.5%)、生物菌肥(上海时科生物科技有限公司研制)、有机肥(宁夏新方向生物科技有限公司生产)和小麦秸秆。其中,有机肥主要成分为:有机质≥49%,N+P₂O₅+K₂O≥5%;生物菌肥主要成分为:有机质≥45%,氨基酸≥3%,腐殖酸≥6%,有效活菌

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the testing soil

理化性质 Physical-chemical property	含量 Content
pH	8.65
EC/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	189.00
有机质 Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	15.21
全氮 Total N/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.31
全磷 Total P/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.00
碱解氮 Alkali-hydrolyzed N/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	97.36
有效磷 Available P/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	36.79
速效钾 Available K/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	170.31

数≥2.0 亿·g⁻¹。不同材料的全磷含量分别为:硫磺:0 g·kg⁻¹;生物菌肥:0.19 g·kg⁻¹;有机肥:3.3 g·kg⁻¹;秸秆:0.37 g·kg⁻¹。供试肥料为尿素(N 46%)。

1.2 试验方法

培养试验:称取 100 g 过 1 mm 筛的风干土样置于培养盒中(盒底直径 5.4 cm,盒口直径 7.3 cm,斜高 3.9 cm),添加不同比例的硫磺粉(每 100 g 干土中添加改良材料的用量,用百分数表示,S:0.05%、0.15%、0.45%,分别记为 S_{0.05}、S_{0.15}、S_{0.45})、生物菌肥(B:0.25%、0.50%、1.00%,分别记为 B_{0.25}、B_{0.50}、B_{1.00})、有机肥(OM:0.50%、1.00%、2.00%,分别记为 OM_{0.50}、OM_{1.00}、OM_{2.00})、秸秆(WS:1.00%、2.00%、4.00%,分别记为 WS_{1.00}、WS_{2.00}、WS_{4.00})。然后向土壤中加入 100 mg·kg⁻¹的 P(KH₂PO₄)充分混匀,加蒸馏水调节土壤含水量为田间持水量的 75%。同时设置对照(CK,不添加改良材料)。25℃下恒温培养,培养盒盖中央留一小孔,保证土壤微生物氧气供应。培养过程维持土壤含水量不变。每个处理设 3 次重复。在培养的第 2、4、6、8、12、16、20、24、30 天取样,进行微生物量磷和 Olsen P 的测定。

盆栽试验:小麦盆栽试验在光照温室进行(与培养试验保持相同温度)。称取过 2 mm 筛的风干土 2 kg 装入钵钵,分别添加不同比例的硫磺粉(S)、生物菌肥(B)、有机肥(OM)、秸秆(WS)(和培养试验添加比例相同),加入 KH₂PO₄(含 P 22.75%) 0.8791 g,尿素 0.5434 g,混合均匀,加水使土壤含水量保持在田间持水量的 75%。每个处理设置 4 个重复,种植小麦(陇春 26 号),出苗后保留 5 株。小麦生长 30 d 后收获,60℃烘干至恒重并测定植株含磷量。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤理化性质 土壤 pH 采用电位法测定^[11](雷磁 PHS-3C pH 计,上海),土水比为 1:2.5;电导率采用电导法测定^[12](雷磁 DDS-307A 电导率仪,上海),土水比为 1:5;有机质采用重铬

酸钾容量法-外加热法测定^[13]、土壤全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法测定^[13]、土壤全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮,钼锑抗比色法测定^[13]。

1.3.2 小麦植株全磷、土壤 Olsen P 和微生物量磷 小麦植株全磷用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法测定^[13];土壤 Olsen P(反映土壤磷素的有效性^[14])用 0.5 mol·L⁻¹·NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定^[13];土壤微生物量磷采用土壤熏蒸提取法测定^[15-16]。

微生物量磷的计算采用公式:

$$SMB_p = (F - UF) / (K_p \times R)$$

式中, F 和 UF 分别为熏蒸和未熏蒸的土壤浸提液中的磷量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K_p 为微生物量磷系数,表示微生物量磷浸提测定比例,取 0.4; R 为所加入无机磷的回收率。

1.4 数据分析

数据处理采用 SPSS 20 和 Excel 2013, LSD 法比较处理间的差异显著性,显著性水平 $P < 0.05$ 。使用 SigmaPlot 12.5 软件作图及拟合。其中,0 d 时的 Olsen P 值为试验前土壤 Olsen P 含量与试验中磷加入量($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)之和。

2 结果与分析

2.1 不同改良材料对土壤微生物量磷的影响

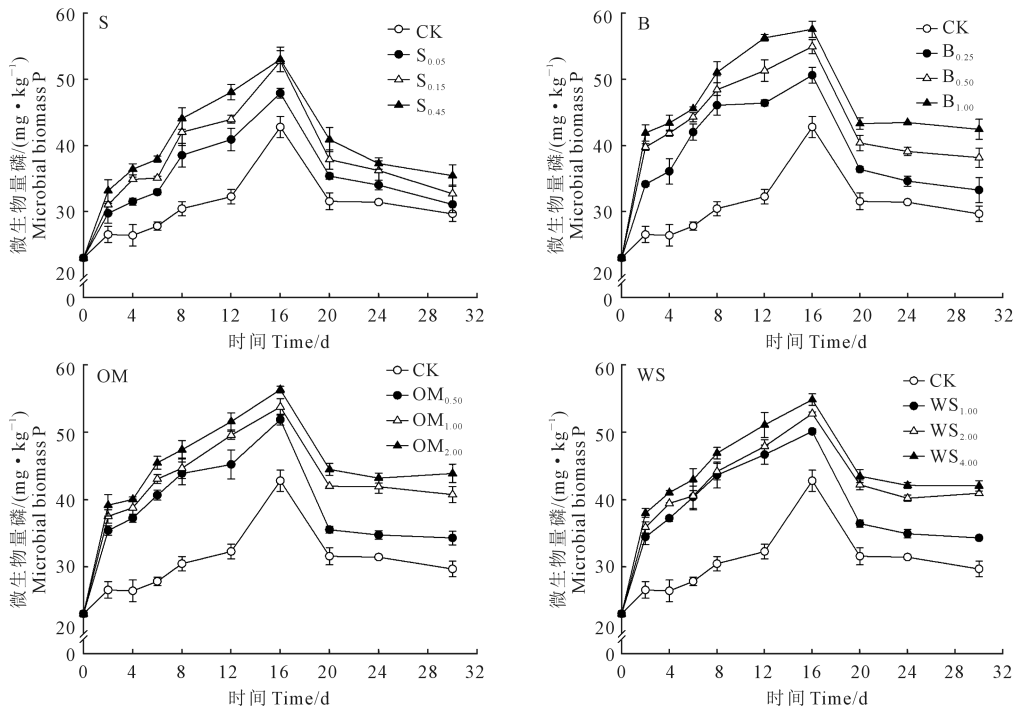
不同改良材料对土壤微生物量磷影响程度不

同。培养初期,各处理土壤微生物量磷均呈持续上升趋势。和对照相比,在第 2 天添加改良材料的土壤增加幅度更大。不同处理土壤微生物量磷含量几乎都在第 16 天左右达到最高值(图 1),然后迅速降低并逐渐稳定。30 d 培养结束时各处理土壤的微生物量磷都高于原始含量且与培养起始阶段(第 2~4 天)水平无显著性差异。不同改良材料之间相比,生物菌肥处理微生物量磷的提高幅度更大。

土壤微生物量磷随 4 种改良材料添加量的增加而增加。培养 16 d 时,加入 0.45% 硫磺处理的土壤微生物量磷比对照增加了 23.90%,比加入 0.05% 硫磺的土壤增加了 10.67%。土壤微生物量磷对生物菌肥的施用比较敏感,随生物菌肥添加比例的增加都有不同程度的提高。在培养的第 30 天,添加 1.00% 生物菌肥的土壤微生物量磷比对照增加了 43.08%,比添加 0.25% 生物菌肥处理增加了 27.64%;加入 2.00% 有机肥处理的土壤微生物量磷比对照增加了 47.92%,较 0.50% 有机肥处理提高了 28.02%;添加 4.00% 秸秆的土壤微生物量磷较加入 1.00% 秸秆处理显著增加了 22.61% ($P < 0.05$)。

2.2 不同改良材料对土壤 Olsen P 的影响

土壤 Olsen P 是对土壤生物(包括微生物和植物)最有效的磷素形态。在整个培养周期内,单独施用磷肥的对照处理土壤 Olsen P 含量呈现先急速



注:S:硫磺粉;B:生物菌肥;OM:有机肥;WS:小麦秸秆。下同。

Note: S: sulfur; B: biological fertilizer; OM: organic fertilizer; WS: wheat straw. The same below.

图 1 不同培养时间下不同改良材料对土壤微生物量磷含量的影响

Fig.1 The effects of different modified soil supplements on soil microbial biomass phosphorus content under different incubation periods

下降后逐渐稳定的趋势,添加改良材料的各处理 Olsen P 含量的变化趋势与对照一致(图 2)。在培养的第 16 天, $S_{0.45}$ 、 $B_{1.00}$ 、 $OM_{2.00}$ 和 $WS_{4.00}$ 处理土壤 Olsen P 含量与对照之间差异性均不显著,而其他处理低于对照($P<0.05$),且 $WS_{4.00}$ 处理显著高于其他处理($P<0.05$)。这可能与改良材料促进 Olsen P 向微生物磷转化有关。

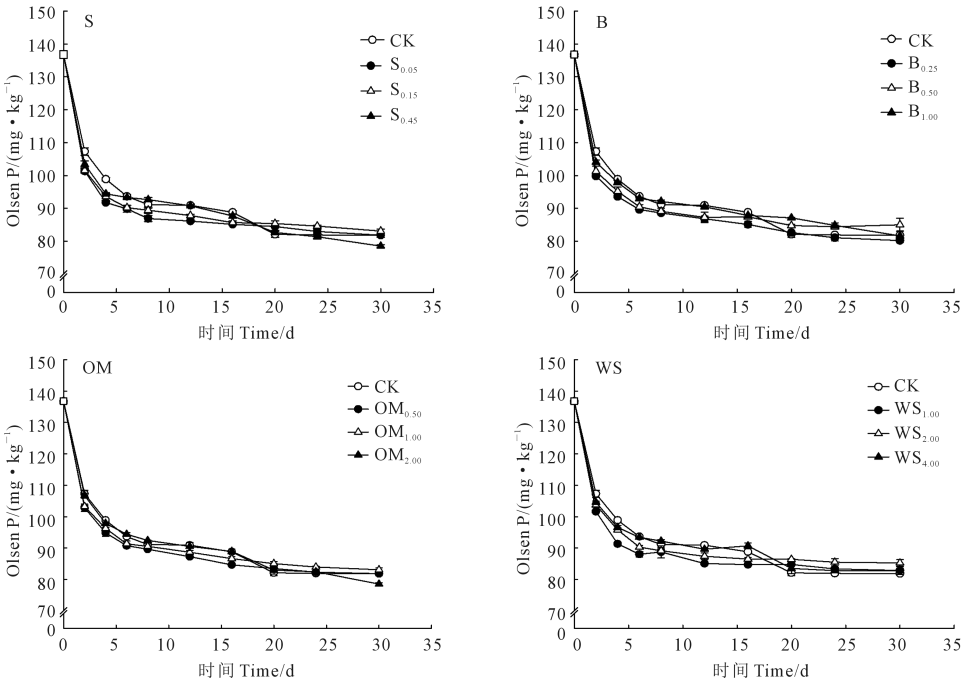


图 2 不同培养时间下不同改良材料对土壤速效磷含量的影响

Fig.2 The effects of different modified soil supplements on soil Olsen P content under different incubation periods

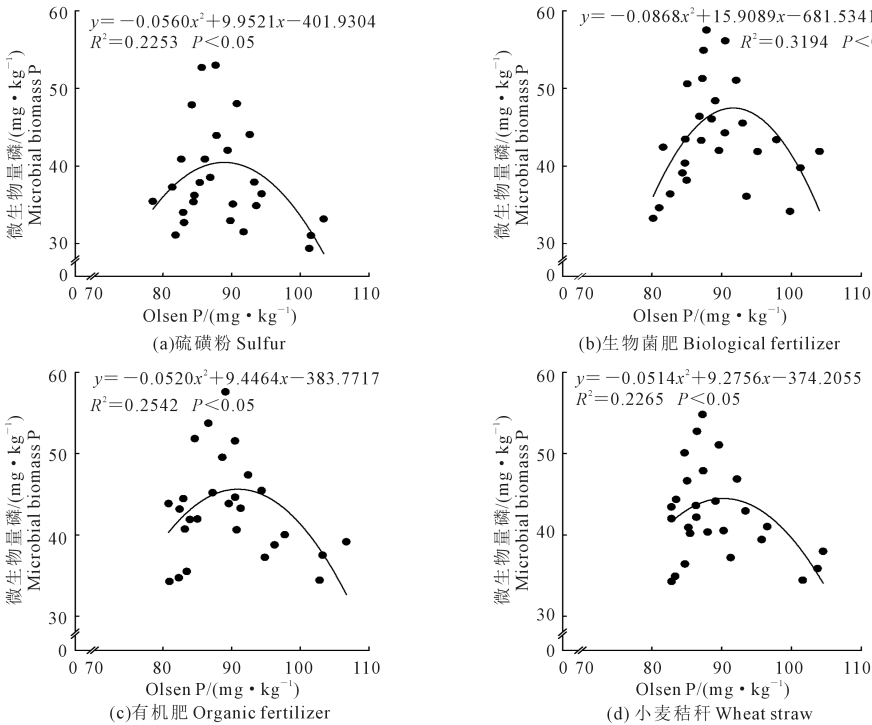


图 3 添加不同改良材料土壤微生物量磷与速效磷之间的关系

Fig.3 The relationship between microbial biomass phosphorus and soil Olsen P with different modified soil supplements

2.3 土壤微生物量磷与土壤 Olsen P 之间的相关性
在 30 d 培养周期内,添加磷肥和改良材料土壤微生物量磷与土壤 Olsen P 呈抛物线关系(图 3),其中生物菌肥处理下两者相关性极显著($P<0.01$)。在一定浓度范围内(Olsen P 约 $90\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),微生物量磷随着 Olsen P 浓度的增加而增加。添加硫磺、生物菌肥、有机肥和秸秆 4 种改良材料,抛物线

对应的微生物量磷最大值分别是 40.04、47.53、45.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 44.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时对应的 Olsen P 浓度分别是 88.89、91.64、90.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 90.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.4 土壤微生物量磷与小麦吸磷量的关系

为探讨土壤微生物量磷与小麦吸磷量间的关系, 对小麦植株吸磷量与培养 16 d 和 30 d 的土壤微

生物量磷进行相关分析(图 4, 图 5)。由图可以看出, 小麦植株吸磷量与培养 16 d、30 d 的土壤微生物量磷之间均呈现极显著的正相关关系($P < 0.01$)。相比较而言, 培养 16 d 的相关系数(R^2) 比培养 30 d 的小(秸秆处理除外)。

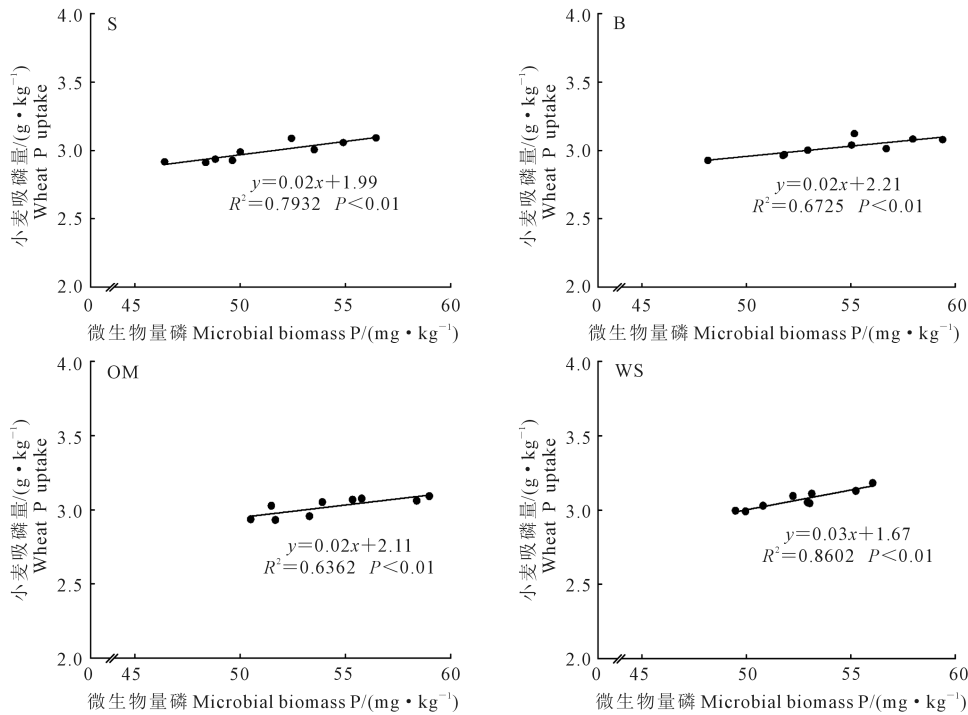


图 4 小麦吸磷量与培养 16 d 的土壤微生物量磷的关系

Fig.4 Relationship between phosphorus uptake in wheat and soil microbial biomass phosphorus after 16 days of incubation

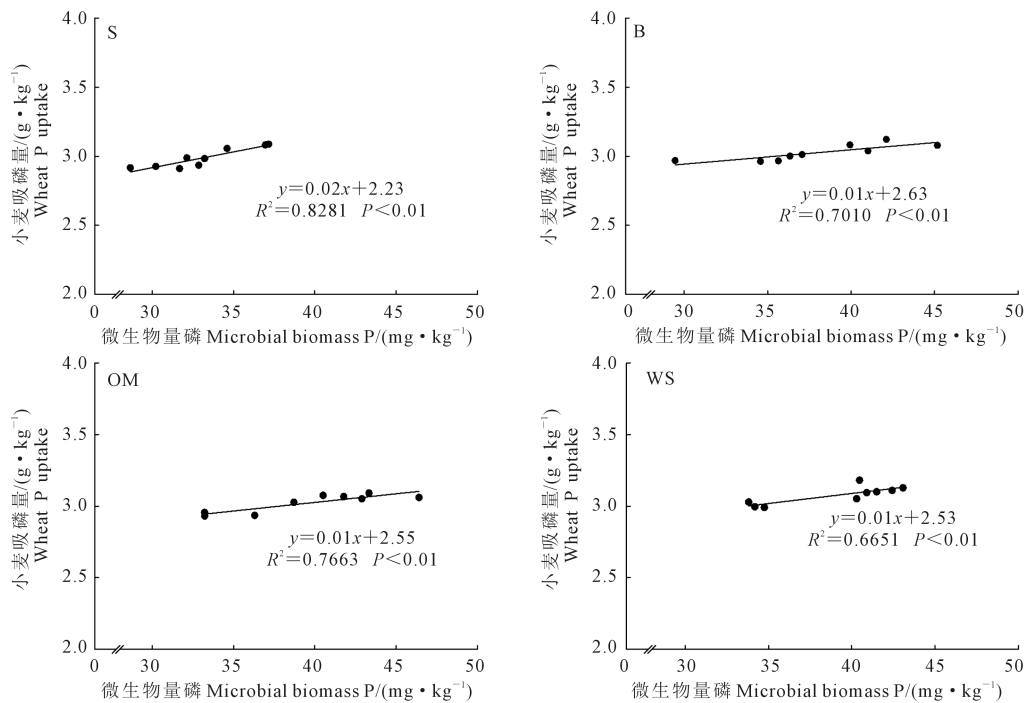


图 5 小麦吸磷量与培养 30 d 的土壤微生物量磷之间的关系

Fig.5 Relationship between phosphorus uptake in wheat and soil microbial biomass phosphorus after 30 days of incubation

不同处理土壤微生物量磷与小麦吸磷量之间所得直线方程的斜率在 16 d 时以添加小麦秸秆的相对较大,说明此时该处理微生物磷对促进磷素吸收的作用更大;在 30 d 时以添加硫磺的最大,反映了硫磺粉对微生物磷和小麦吸收磷方面的促进作用。

3 讨论

3.1 不同改良材料作用下的土壤微生物量磷变化

土壤微生物是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力,它所含的养分是植物生长所需养分的一个重要来源^[17]。本研究发现,在整个培养期内,硫磺粉、生物菌肥、有机肥和小麦秸秆作用下的土壤微生物量磷均表现出初期持续上升的趋势,并在第 16 天左右达到峰值然后降低并趋于稳定。王岩等^[18]研究表明,施用有机、无机肥后,土壤微生物量磷迅速增加随后逐渐降低并基本保持稳定。赵小蓉等^[19]通过向石灰性土壤中加入磷和小麦秸秆培养 90 d 后发现,土壤微生物量磷含量在培养第 20 天达到最大值,与本研究结果有所不同。究其原因,可能与供试土壤类型和性质不同有关。本研究和其他的研究结果均证实加入土壤的无机磷能够迅速被土壤微生物吸收固定转化为微生物量磷^[20],并以多聚磷酸盐形式富集在微生物细胞体内^[21],且微生物量越大,富集磷的能力越强,本试验中生物菌肥处理的微生物量磷含量较高就说明了这一点。

微生物量磷是土壤中极其重要的活性磷库。已有研究表明,土壤环境的改变会导致土壤微生物量磷的变化^[22-23]。本研究也发现,在轻度盐渍化的灌漠土中添加硫磺粉达到一定量时可以提高土壤微生物量磷,原因是硫磺粉被氧化成 SO_4^{2-} ,产生 H^+ 从而降低土壤 pH,促进微生物活动,增加微生物量磷^[24]。添加有机肥、生物菌肥可显著提高土壤微生物量磷,这是因为施用有机肥一方面通过腐殖酸类物质的竞争吸附作用减少了土壤对磷酸根的吸附和固定^[25],另一方面,有机肥能够增加土壤孔隙度,并提供微生物所需要的碳源,增加了微生物活性,从而有利于微生物量磷的生成;生物菌肥含有大量微生物,施入土壤以后不仅直接增加微生物数量,还能改善土壤中微生物生存的环境条件(孔隙状况)和营养状况(碳源),更有利于微生物量磷的增加^[26]。在土壤中添加秸秆也能促进微生物繁殖,微生物从土壤中吸取部分磷作为自身机体的组成部分,将土壤磷同化为微生物磷^[27],但小麦秸秆对微

生物量磷的影响小于有机肥和生物菌肥。

3.2 土壤微生物量磷与土壤 Olsen P 之间的关系

本试验结果表明,在 30 d 的培养周期内,土壤微生物量磷呈现先上升后下降并逐步稳定的趋势,且显著高于单独添加磷肥的对照处理。无机磷肥的加入使土壤速效磷在培养初期急剧下降后逐渐稳定,这是土壤对加入磷肥中水溶性磷的固定所引起的。培养前期土壤的速效磷高(固定的时间短),而微生物量磷的形成需要一个微生物数量的增加过程,其值随时间推移逐渐增加,但超过一定时间后(大约 16 d 左右),微生物量磷又随碳源等减少、微生物死亡而下降。因此在添加无机磷肥和改良材料的培养试验 30 d 期间,土壤速效磷与土壤微生物量磷表现为抛物线关系,这与来璐等^[28]关于在潮土中加入无机磷,土壤有效磷与微生物量磷之间存在极显著的抛物线关系的结果相似。Chauhan 等^[29]也证实土壤中有有效磷含量对土壤微生物量磷有显著影响。但也有不同的报道,如谢林花等^[30]指出,石灰性土壤施磷和小麦秸秆后,土壤微生物磷与土壤速效磷之间呈极显著正相关。本研究结果显示,土壤速效磷含量低于 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤微生物量磷浓度随速效磷提高而提高。

3.3 小麦植株吸磷量与土壤微生物量磷的关系

土壤微生物量磷关系到土壤磷素的供给和调节^[31],其植物有效性问题一直受到土壤工作者的重视。本研究结果表明,硫磺粉、生物菌肥、有机肥和秸秆处理的小麦植株吸磷量与培养 16 d 和 30 d 的土壤微生物量磷均表现出极显著的正相关关系。Ayaga 等^[32]报道,有机无机肥配合施用于低磷土壤,可以促进生物循环,提高其有效性,从而提高植物对土壤和肥料磷的吸收。陈国潮等^[33]研究表明,红壤微生物量磷与黑麦草吸磷量之间的相关性达极显著水平。

4 结论

采用甘肃河西地区灌漠土添加不同改良材料对土壤微生物磷及其生物有效性的研究证明,与单独添加磷肥的对照相比,硫磺、生物菌肥、有机肥和秸秆 4 种改良材料都能在一定程度上提高土壤微生物磷含量,且随着改良材料用量的增加而增加,在第 16 天时土壤微生物磷含量达到最大,这在一定程度上减少了磷的物理化学固定,从而提高磷肥利用效率。土壤微生物量磷与土壤 Olsen P 之间存在显著的抛物线关系,且小麦吸磷量与土壤微生物量磷(16 d 和 30 d)呈显著正相关关系。相比而言,生物

菌肥较其他材料更能促进土壤微生物磷增加,提高磷的生物有效性。

参 考 文 献:

[1] Park J H, Matzner E. Controls on the release of dissolved organic carbon and nitrogen from a deciduous forest floor investigated by manipulations of aboveground litter inputs and water flux[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66 (3):265-286.

[2] Ma N, Qi M, Li T. Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities at different developmental stages of tomato [J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2014, 8: 647-652.

[3] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 不同用量有机肥对陇东旱塬黑垆土磷素形态转化及有效性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (2) :32-38.

[4] 郭斗斗, 黄绍敏, 张珂珂, 等. 有机无机外源磷素长期协同使用对潮土磷素有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018,24(6) : 241-249.

[5] Wang B, Li J M, Ren Y, et al. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat-maize rotation production areas of China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 178: 42-48

[6] 毛文娟. 不同改良剂对宁夏平罗盐碱土改良研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[7] El-Sayed S F, Hassan H A, El-Mogy M M. Impact of bio-and organic fertilizers on potato yield, quality and tuber weight loss after harvest [J]. *Potato Research*, 2015, 58(1) :67-81.

[8] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 等. 有机无机配施对滨海盐渍化土壤磷含量及水稻生长、产量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1) : 203-210.

[9] 郭成藏, 李鲁华, 黄金花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 32(3) : 296-304.

[10] 逢焕成, 李玉义. 西北沿黄灌区盐碱地改良与利用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[11] Ray, Ent G E, Lyons D J. Soil chemical methods—Australia[M]. Melbourne: Csiro Publishing, 2010.

[12] Rayment G E, Higginson F R. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods[M]. Melbourne: Inkata Press, 1992.

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

[14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[15] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14: 319-329.

[16] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1) :70-78.

[17] 高云超,朱文珊,陈文新. 土壤微生物生物量周转的估算[J]. *生态学杂志*, 1993, 12(6) :6-10 .

[18] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 等. 有机、无机肥料施用后土壤生物量 C、N、P 的变化及 N 素的转化[J]. *土壤学报*, 1998, 35(2) : 227-233.

[19] 赵小蓉, 周然, 李贵桐, 等. 低磷石灰性土壤施磷和小麦秸秆后土壤微生物量磷的变化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2) :325-330.

[20] Kouno K, Wu J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002,34(5) :617-622.

[21] Bünemann E K, Smernik R J, Marschner P, et al. Microbial synthesis of organic and condensed forms of phosphorus in acid and calcareous soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(4) : 932-946.

[22] Parfitt R L, Yeates G W, Ross D J, et al. Relationships between soil biota, nitrogen and phosphorus availability, and pasture growth under organic and conventional management [J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(1) :0-13.

[23] 张电学, 韩志卿, 李东坡, 等. 不同促腐条件下秸秆还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (10) :1903-1908.

[24] 林葆, 李书田, 周卫. 影响硫磺在土壤中氧化的因素[J]. *土壤肥料*, 2000, (5) :3-8.

[25] 宁川川, 王建军, 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.

[26] 刘艳, 李波, 隗英华, 等生物有机肥对盐碱地玉米渗透调节物质及土壤微生物的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(5) :142-147.

[27] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO₂ 释放和土壤微生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3) :469-472.

[28] 来璐, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 土壤微生物量磷及碳磷比对加入无机磷的响应[J]. *中国农业科学*, 2006,39(10) :97-102.

[29] Chauhan B S, Stewart J W B, Paul E. Effect of labile inorganic phosphate status and organic carbon additions on the microbial uptake of phosphorus in soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1981, 61: 373-385.

[30] 谢林花, 吕家珑, 张一平. 长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4) :65-68.

[31] 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, 21(6) :993-996.

[32] Ayaga G, Todd A, Brookes P C. Enhanced biological cycling of phosphorus increases its availability to crops in low-input sub-Saharan farming systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(1) : 81-90.

[33] 陈国潮, 何振立, 黄昌勇. 菜茶果园红壤微生物量磷与土壤磷以及磷植物有效性之间的关系研究[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1) : 75-80.