

# 矿物质调理剂对土壤养分含量及植物营养吸收的影响<sup>①</sup>

龚玲婷<sup>1</sup>, 石林<sup>1,2\*</sup>, 蔡如梦<sup>1</sup>

(1 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

**摘要:**通过室内培养和盆栽试验,研究了氮磷肥配施不同量(0、0.5、1.0、2.0 g/kg)矿物质调理剂对土壤 pH 和有效磷、钙、镁、硅等养分含量及作物产量和氮、磷、钾等营养元素吸收的影响。室内培养结果表明:施用 1.0 g/kg 和 2.0 g/kg 调理剂,不仅增强了土壤抗酸化能力,使土壤 pH 从 5.02 提高到 5.31 和 5.61,并且延缓了磷肥施入土壤后的固定速率,在施肥后第 15 天和第 22 天土壤有效磷含量得到明显增加,增幅分别为 21.49%、24.17% 和 22.09%、23.84%。盆栽试验中,施用 0.5~2.0 g/kg 调理剂,土壤矿质养分得到有效补充,并能实现生菜增产 10.47%~33.33%;同时,使生菜氮、磷、钾吸收量分别提高 14.69%~44.26%、15.28%~52.89% 和 16.28%~42.43%。由此,施用矿物质调理剂是农业种植中改善土壤酸性、补充土壤有效养分、促进作物营养吸收并实现增产的有效途径。

**关键词:**矿物质调理剂;土壤养分;有效磷;营养吸收

中图分类号: S158.3; S147.5 文献标识码: A

磷是作物生长发育所必需的营养元素,施用磷肥是为作物提供磷素的主要途径之一。但磷肥直接施入土壤后极易被固定,随着时间的延长有效性逐渐降低,形成作物难以吸收利用的非有效态磷酸盐<sup>[1-2]</sup>。因而,农业生产中磷肥的投入量要远高于作物需求量才能满足作物的生长需要,造成我国磷肥当季利用率只有 10%~20%<sup>[3]</sup>。长期大量不合理地施用磷肥,一方面浪费磷矿资源,另一方面增加了地表水富营养化的风险<sup>[4]</sup>。因此,针对当前我国磷肥施用现状,研究如何维持作物高产稳产的同时,减少磷肥在土壤中的固定,提高磷肥利用率及减少磷肥施用量对农业种植具有重要意义。

土壤调理剂是指加入土壤中用于改善土壤的物理、化学和(或)生物活性的物料<sup>[5]</sup>,用于改良土壤结构、降低土壤盐碱危害、调节土壤酸碱度、改善土壤水分和养分供应状况或修复污染土壤等<sup>[6]</sup>。一些学者按其材料来源将其分为 4 种类型,即高分子类、有机类、矿物类和其他类型<sup>[7]</sup>。其中,矿物型土壤调理剂是指天然矿物、固体废弃物和人工生产的含有多种矿物质元素的可以改善土壤特性的物料<sup>[8]</sup>,对于土壤的改良具有良好的效果。施用石灰、石灰石、磷石膏、脱硫石膏等钙基矿物质调理剂是一项传统而有效的

酸性土壤改良措施。Caire 等<sup>[9]</sup>和鲁燕红等<sup>[10]</sup>研究都表明,石灰处理提高了土壤的 pH 和交换性钙含量,降低了土壤交换性铝含量。沸石、蛭石、膨润土等天然矿石制造而成的土壤调理剂多具有高吸附性、离子交换性等性能,且富含多种矿物质元素。魏莎等<sup>[11]</sup>利用天然沸石加香叶天竺葵作为土壤调理剂,发现土壤全氮、有效磷和有机质含量均有一定程度的提高。泥炭、褐煤、风化煤等富含腐殖酸、有机质和氮磷钾养分,施用土壤后可直接改善土壤养分匮乏的状况。王洪凤等<sup>[12]</sup>施用风化煤腐殖酸增加了土壤中阳离子交换量和团聚体总量,活化和释放土壤中难溶性磷、缓效钾,使其转化为速效磷和速效钾,有益于土壤肥力的提高。但是,与肥料相比,土壤调理剂的施用量相对较大,并且需要多次或多季施用,潜在的环境风险很大,尤其是固体废弃物类的调理剂,长期大量施用可能会造成土壤中重金属累积,并最终通过食物链威胁到人类。

本研究中采用的矿物质调理剂是由钾长石、白云石和石灰石等合理配比后,经高温焙烧活化制得的一种呈弱碱性并富含钾、钙、镁、硅、硫等多种矿质营养元素的构溶性物质,且该调理剂原料为不含重金属的天然非金属材料矿石,故不会对土壤产生重金属污

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B05+2)、广州市 2016 年污染防治新技术新工艺示范和应用项目资助。

\* 通讯作者(celshi@126.com)

作者简介: 龚玲婷(1992—),女,湖南株洲人,硕士研究生,主要从事土壤修复研究。E-mail: 1761523579@qq.com

染问题。此前对该调理剂的研究主要集中在改善土壤酸性、钝化土壤重金属、抑制土壤铝毒等方面,并取得了良好的效果<sup>[13-14]</sup>。本研究旨在前期研究的基础上,进一步探究该调理剂在与化肥配施的条件下对土壤酸度和养分供应状况,尤其是磷素供应,及其对作物产量和营养吸收的影响,以期为该调理剂的农田应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自广州市增城区正果镇水稻土 0 ~ 20 cm 耕作层,其基本理化性质为:pH 6.43、有机质 39.05 g/kg、碱解氮 181.02 mg/kg、有效磷 44.83 mg/kg、速效钾 275.51 mg/kg、有效镁 100.71 mg/kg、有效钙 1 937.86 mg/kg、有效硅 158.26 mg/kg。供试作物为生菜,生育期为 40 ~ 60 d。供试肥料为尿素(N 466.7 g/kg)、磷酸二氢钾(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 521.6 g/kg; K<sub>2</sub>O 346.1 g/kg)

分析纯试剂。供试矿物质调理剂的化学成分和 pH 如表 1 所示,其中,调理剂的化学成分采用 X 射线荧光光谱仪分析得到。

### 1.2 试验设计

室内培养试验设置 0、0.5、1.0、2.0 g/kg (以调理剂与土壤的质量比计)4 个调理剂使用量处理,每个处理 3 个重复。称取 150 g 通过 2 mm 筛的风干土样,分别按试验设计与调理剂混合均匀后装入塑料杯中,记为 CK、T1、T2、T3。同时分别称取 0.065 g 尿素(N 200 mg/kg)和 0.058 g 磷酸二氢钾(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 200 mg/kg)溶解于 70 ml 去离子水中,加入塑料杯。调节水分至土壤田间持水量,用保鲜膜封口,并在保鲜膜中间留几个小孔,置于室内培养,每隔几天称重补水。培养期间分别于第 4、8、15、22、29、36 天取样,测定土壤 pH 和有效磷含量。最后一次土样,同时测定土壤钙磷、铝磷、铁磷和闭蓄态磷含量。

表 1 矿物质调理剂基本特征  
Table 1 Basic characteristics of tested mineral conditioner

成分	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pH
质量含量(g/kg)	51.3	5.3	342.8	58	107.7	285.2	100.6	5.9	10.5

盆栽试验处理设置同上,采用直径 19 cm × 高 17 cm 的塑料盆,每盆装土 3.37 kg。试验时将 1/3 氮肥和全部磷肥与土壤混合均匀,将混合土壤的 2/3 置于塑料盆底部,1/3 与矿物质调理剂混合均匀后装盆,加水至土壤田间持水量的 70%,移栽 3 株长势一致的生菜苗。另外的 2/3 氮肥作为追肥,分两次兑水淋施。45 d 后,收获植物地上部分,称量鲜重后烘干,测定干重、全氮、全磷、全钾含量。并随机采集每盆表层土样混合,风干,过筛,用于测定土壤速效钾、有效钙、有效镁和有效硅含量。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质测定 pH 用电位法测定;有效磷用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸取-钼锑抗比色法测定;钙磷、铝磷、铁磷和闭蓄态磷分别用 0.5 mol/L (1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、0.5 mol/L NH<sub>4</sub>F、0.1 mol/L NaOH 和 0.3 mol/L 柠檬酸钠-连二亚硫酸钠分级连续浸取-钼锑抗比色法测定;有效钙和镁用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAC 浸提-火焰原子吸收分光光度法测定;速效钾用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAC 浸提-火焰光度计法测定;有效硅用 CH<sub>3</sub>COOH-CH<sub>3</sub>COONa 缓冲液浸提-硅钼蓝比色法测定<sup>[15]</sup>。

1.3.2 植株养分指标的测定 植株样品经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消解,用纳氏比色法测定全氮,钼锑抗比色法测定全磷,火焰光度计法测定全钾<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 软件进行数据整理,SPSS19.0 软件进行方差分析,Duncan 法进行多重比较。Origin 9.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 矿物质调理剂对土壤 pH 的影响

土壤 pH 是反映土壤酸碱状况的重要指标,直接影响土壤养分的存在形态、转化和有效性,进而影响作物的生长发育<sup>[16]</sup>。图 1 为各处理土壤 pH 在培养过程中的变化趋势。由图 1 可知,培养前期(第 4 天),在调理剂施加量为 1.0 g/kg 和 2.0 g/kg 时,土壤 pH 较 CK 分别显著增加了 0.20 和 0.34 个单位( $P < 0.05$ )。随着培养时间的延长,各处理的土壤 pH 均呈下降趋势。培养至 29 d 后,土壤 pH 趋于稳定。主要原因可能是土壤中尿素水解产生的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 可以通过细菌的作用转化为亚硝酸或硝酸盐,并产生 H<sup>+</sup>,降低土壤 pH<sup>[17]</sup>,之后随着硝化反应的减弱,对土壤 pH 的影响减小。鲁如坤和赖庆旺<sup>[18]</sup>证实,尿素施入土壤 7 d 左右时就有硝化作用出现,但开始比较缓慢,10 d 后硝化作用加速进行,到 30 d 时即有 80% 转化成硝态氮,30 d 后硝化作用以较慢的速度进行。本试验培养结束

后, 施加 0.5 g/kg 调理剂处理土壤 pH 无明显变化; 施加 1.0 ~ 2.0 g/kg 调理剂处理土壤 pH 从 5.02 提高到 5.31 ~ 5.61, 较 CK 增加了 0.29 ~ 0.59 个单位, 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。说明施加 1.0 ~ 2.0 g/kg 调理剂, 对施加化肥导致的土壤酸化具有一定的抵抗能力, 而施加 0.5 g/kg 调理剂, 效果则不明显。主要原因可能是: 该调理剂本身呈碱性, 其水解出来的  $\text{OH}^-$  能中和土壤溶液中的  $\text{H}^+$ , 直接提高了土壤 pH<sup>[19]</sup>。酸性水稻土中铁铝氧化物含量较高, 对阴离子具有较强的吸附能力。该调理剂释放的  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$  等阴离子可与土壤发生配位交换吸附, 释放出  $\text{OH}^-$  而增加土壤的 pH<sup>[20]</sup>。该调理剂中的有效成分如硅酸钙, 能和土壤环境中的游离  $\text{Al}^{3+}$  结合成无定型的羟基铝硅酸盐矿物, 有利于提高土壤 pH<sup>[13,21]</sup>。

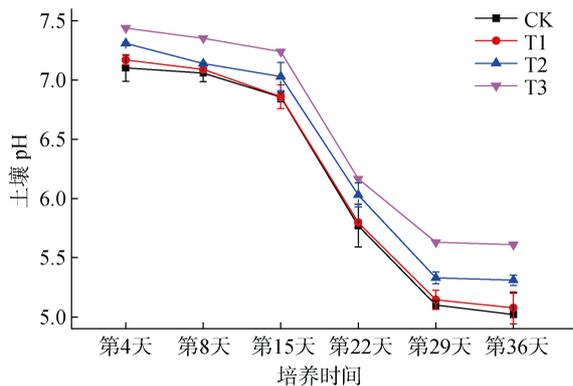
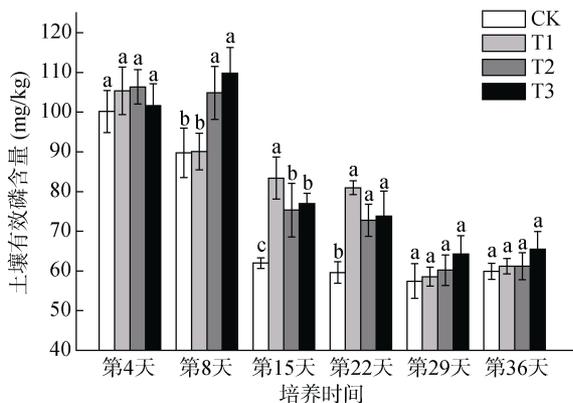


图 1 矿物质调理剂对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Soil pH under different dosages of mineral conditioner

## 2.2 矿物质调理剂对土壤磷素有效性及转化的影响

2.2.1 矿物质调理剂对土壤有效磷含量的影响 图 2 为各处理土壤有效磷含量在培养过程中的变化趋势。



(图中小写字母不同表示同一时间各处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平, 下同)

图 2 矿物质调理剂对土壤有效磷含量的影响

Fig. 2 Soil available phosphorus contents under different dosages of mineral conditioner

由图 2 可知, 培养至第 4 天时, 不同处理土壤有效磷水平一致, 无明显差异。培养至第 8 天时, 与 CK 相比, 当施加量为 0.5 g/kg 时, 土壤有效磷含量无显著变化; 当施加量为 1.0 g/kg 和 2.0 g/kg 时, 土壤有效磷含量分别提高了 16.85% 和 22.38%。培养至第 15 天时, 施加 0.5、1.0 和 2 g/kg 调理剂处理土壤有效磷含量较 CK 分别提高了 34.54%、21.49% 和 24.17%。培养至第 22 天时, 施加 0.5、1 和 2g/kg 调理剂处理土壤有效磷含量则分别提高了 35.86%、22.09% 和 23.84%。培养 29 d 后, 各处理间有效磷含量重新达到无差异水平。这说明施加 0.5 ~ 2.0 g/kg 调理剂可以使土壤磷素有效性在磷肥施加后约 1 ~ 3 周内得到提高。

2.2.2 矿物质调理剂对土壤各形态无机磷含量的影响 在大部分土壤中, 无机磷含量约占土壤全磷量的 50% ~ 90%。土壤中无机磷化合物几乎全部为正磷酸盐, 根据结合的主要阳离子不同, 可将中酸性土壤无机磷分为 4 种形态: 钙磷、铝磷、铁磷和闭蓄态磷<sup>[22]</sup>。图 3 为土壤培养结束后, 各处理土壤中各形态无机磷含量情况。由图 3 可知, 施加 0.5 ~ 2.0 g/kg 调理剂后, 土壤钙磷和闭蓄态磷含量与 CK 相比无明显差异; 铝磷含量提高了 5.53% ~ 13.83%。这可能是因为调理剂中存在铝酸三钙 ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ )<sup>[13]</sup>, 其能与  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和水生成难溶的针状钙矾石 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), 而钙矾石在酸性条件下可发生水解产生铝胶。此外, 随着土壤 pH 的升高, 土壤中的交换性铝可以聚合成羟基聚合铝<sup>[14]</sup>。因此, 施用调理剂后土壤铝磷含量的升高可能是由于该调理剂增加了土壤中羟基铝含量, 从而促进了铝氧化物对土壤磷素的专性吸附。

从图 3 中还可看出, 施加不同量调理剂会对土壤铁磷含量产生不同的影响。当施加量为 0.5 g/kg 时, 铁磷含量较 CK 增加了 16.36%; 当施加量为 1.0 g/kg 时, 铁磷含量较 CK 无明显差异; 当施加量为 2.0 g/kg 时, 铁磷含量下降了 7.74%。说明调理剂低施加量下可能有利于土壤氧化铁的活化, 增强对磷素的专性吸附能力; 随着调理剂施加量的增加, 土壤中  $\text{OH}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$  等阴离子含量得到提高, 这些阴离子会与磷酸根产生竞争吸附, 促进土壤磷素的解吸, 逐渐减少铁氧化物对磷素的固定<sup>[23]</sup>。

## 2.3 矿物质调理剂对土壤有效矿质元素含量的影响

钾、钙、镁、硅是植物根系从土壤吸收的维持植物正常生长所需的重要元素。图 4 为盆栽试验结束后, 各处理土壤有效矿质元素含量情况。由图 4 可知, 除交换性钾外, 施加矿物质调理剂有效提高了土壤有效矿质元素含量, 且增幅随调理剂施加量的增大而增大。CK 处理中, 土壤矿质养分钙、镁、硅和钾的含

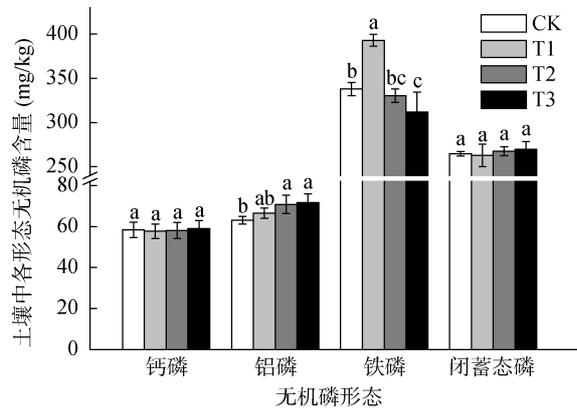


图 3 矿物质调理剂对土壤各形态无机磷含量的影响  
Fig. 3 Composition of soil inorganic phosphorus under different dosages of mineral conditioner

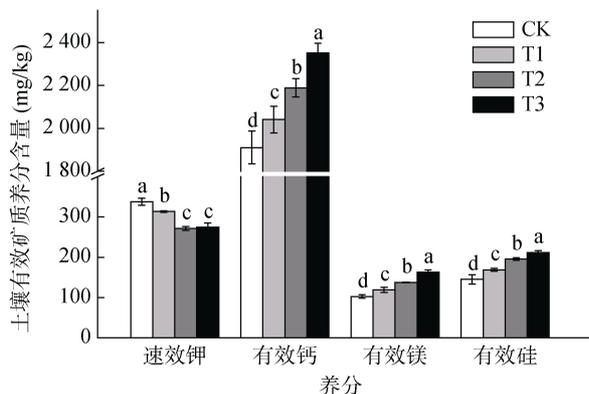


图 4 矿物质调理剂对土壤矿质元素含量的影响  
Fig. 4 Soil mineral element contents under different dosages of mineral conditioner

量分别为 1 910.13、102.28、144.83、337.68 mg/kg。与 CK 相比,施用 0.5 ~ 2.0 g/kg 调理剂后,土壤有效钙、镁、硅含量分别增加了 6.85% ~ 23.08%、16.17% ~ 59.04%、16.35% ~ 46.27%,而速效性钾含量有所降低。这是因为该调理剂中以枸溶性铝硅酸盐形式存在的钙、镁和硅,具有缓释和长期效应,能有效补充土壤矿质养分,而以水溶性硫酸盐存在的钾易被作物吸收利用并随灌溉水淋失。

### 2.4 矿物质调理剂对生菜产量的影响

由表 2 可知,生菜产量随矿物质调理剂施用量的增加呈先增后减的趋势,大小顺序为 T2>T1>T3>CK。与 CK 相比,施加 0.5、1.0 和 2.0 g/kg 调理剂处理作物产量分别显著增加了 13.79%、33.33%、10.47%( $P<0.05$ )。说明施加适量矿物质调理剂,可以有效促进作物生长,提高作物产量;但施加量过大,对作物的增产效果出现下降。

表 2 矿物质调理剂对生菜产量的影响  
Table 2 Lettuce yields under different dosages of mineral conditioner

处理	产量(g/盆)	干重(g/盆)	增产率(%)
CK	59.02 ± 0.42 d	2.07 ± 0.01 d	-
T1	67.16 ± 0.23 b	2.35 ± 0.01 b	13.79
T2	78.69 ± 0.33 a	2.75 ± 0.01 a	33.33
T3	65.20 ± 1.64 c	2.28 ± 0.06 c	10.47

注:同列数据后不同字母表示处理间在  $P<0.05$  水平上差异显著,下同。

### 2.5 矿物质调理剂对生菜营养吸收的影响

从表 3 可知,施加矿物质调理剂有效提高了生菜对氮、磷、钾的吸收,增幅均随调理剂施加量的增加呈先增后减的趋势,且在施加量为 1 g/kg 时,达到最大。当施加量为 0.5、1.0 和 2.0 g/kg 时,与 CK 处理相比,氮吸收量分别增加了 18.74%、44.26%、14.69%,磷吸收量分别增加了 16.59%、52.89%、15.28%,钾吸收量分别增加了 19.45%、42.43%、16.28%,均达到显著性差异水平( $P<0.05$ )。且施加 1.0 g/kg 调理剂时,生菜氮、磷、钾含量较 CK 处理分别显著增加了 8.20%、14.63%、6.82%( $P<0.05$ );而施加 0.5 g/kg 和 2.0 g/kg 调理剂时,生菜氮、磷含量变化不明显,钾含量显著提高( $P<0.05$ )。表明施加适量(1 g/kg)调理剂能有效增加作物对氮、磷、钾等营养元素的吸收,而过低或过高的施加量,都会降低对作物营养吸收的促进效果。

表 3 矿物质调理剂对生菜养分吸收的影响  
Table 3 Nutrient absorption in lettuces under different dosages of mineral conditioner

处理	养分含量(mg/g)			养分吸收量(mg/盆)		
	N	P	K	N	P	K
CK	103.40 ± 0.30 b	5.23 ± 0.19 b	60.64 ± 0.00 b	213.59 ± 0.63 c	10.80 ± 0.39 c	125.26 ± 3.12 d
T1	107.90 ± 2.19 ab	5.36 ± 0.12 b	63.65 ± 0.31 a	253.63 ± 5.15 b	12.59 ± 0.28 b	149.62 ± 0.72 b
T2	111.88 ± 4.91 a	6.00 ± 0.09 a	64.78 ± 1.04 a	308.13 ± 13.54 a	16.51 ± 0.25 a	178.41 ± 2.86 a
T3	107.35 ± 4.60 ab	5.45 ± 0.05 b	63.83 ± 0.75 a	244.96 ± 10.49 b	12.45 ± 0.11 b	145.65 ± 1.72 c

### 3 讨论

本研究表明,化肥配施适量矿物质调理剂能显著促进作物生长,提高作物产量。综合分析主要作用机制如图 5 所示,即配施调理剂后,在土壤酸性环境改善、有效矿质养分补充、磷素供应水平提高和营养元素的互作关系等因素的共同作用下,作物对氮、磷、钾等营养元素的吸收得到增强,从而实现作物增产。

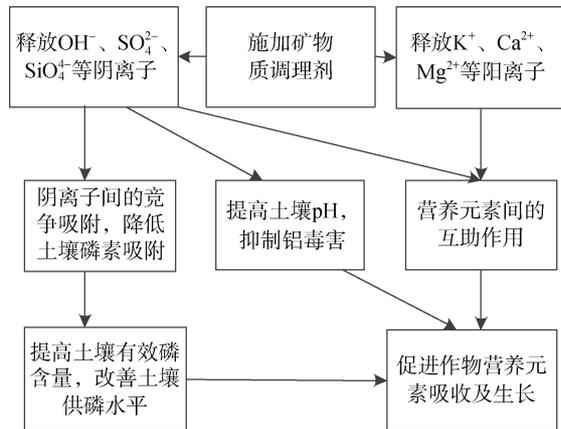


图 5 矿物质调理剂促进作物生长机理示意图

Fig.5 Mechanism of mineral conditioner promoting crop growth

#### 3.1 矿物质调理剂促进土壤磷素有效性机制探讨

土壤有效磷是指能够被植物吸收利用的磷组分,包括全部水溶性磷、部分吸附态磷及有机态磷,有的土壤中还包某些沉淀态磷。土壤磷的有效性是磷由土壤固相向液相的释放过程,主要包括无机磷的溶解、吸附态磷的解吸、有机磷的矿化以及磷在迁移过程中与其他土壤组分的反应等<sup>[24]</sup>。本研究中,CK 处理的有效磷含量在培养 15 d 后达到稳定。施加 0.5、1.0 和 2.0 g/kg 调理剂时,有效磷含量分别在培养 29、29、15 d 后达到稳定,且在培养 8~29 d 期间,总体上高于 CK 处理。说明该调理剂有利于促进土壤磷素有效性,降低磷肥施入土壤后的固定速率,提高土壤的供磷水平。主要原因可能是: 培养前期,土壤呈中性( $6.5 < \text{pH} < 7.5$ ),磷主要与  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  形成易溶性的磷酸钙和磷酸镁类化合物<sup>[25]</sup>,所以调理剂释放的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  有利于有效性较高的磷酸盐化合物的生成。培养中后期,土壤 pH 下降至酸性( $\text{pH} < 6.5$ ),一方面,磷酸钙和磷酸镁类化合物可向溶解的方向进行,增加土壤磷素有效性<sup>[26]</sup>;另一方面,该调理剂释放了大量的  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,硅、磷由于具有相似的结构与化学性质,在土壤胶体表面会产生竞争吸附,即硅会占据部分磷的吸附点位或区域,甚至将部分土壤吸附态磷取代下来<sup>[23]</sup>,从而降低土壤对磷素

的吸附固定,增加土壤有效磷含量,且随着 pH 和硅含量的升高,硅对磷的竞争吸附能力增强<sup>[27]</sup>。

#### 3.2 矿物质调理剂对作物营养吸收影响机制探讨

植物的营养状况取决于诸多因子。本研究探讨了施用含钙、镁、硅等多种元素的矿物质调理剂,对植物营养元素吸收的影响。本研究结果表明,施加适量矿物质调理剂能有效提高植物氮、磷、钾等营养元素的吸收量,且增加幅度随着调理剂施加量的增加呈先增后减的趋势。这可能是因为多种营养元素共存的同一土壤环境中,植物吸收利用营养元素时,存在着相互协同、拮抗作用<sup>[28]</sup>。一方面,氮、磷、钾间互促关系已被证实,其中任何一种养分丰缺都会影响作物对其余两种养分的吸收利用<sup>[29]</sup>,所以施加矿物质调理剂后,改善了土壤酸度并提高了土壤磷素供应水平,有利于作物磷素吸收的同时也会促进氮、钾同步吸收。另一方面,钙、镁、硅是植物重要的营养元素,对植物生长发育具有重要作用。大量研究表明,施加适量钙<sup>[30-31]</sup>、镁<sup>[32]</sup>、硅<sup>[33-35]</sup>有利于提高植物叶绿素含量,增强光合作用,从而促进植物对氮、磷、钾等营养元素的吸收,但施加过量会破坏植物光合系统结构,降低光化学效率,影响植物生长。这与本研究中,施加 1.0 g/kg 调理剂时,植物营养吸收和产量均高于施加量为 2.0 g/kg 处理的结果相符合。

### 4 结论

1)施用 1.0~2.0 g/kg 调理剂,对施加化肥导致的土壤酸化具有一定的抵抗作用,使土壤 pH 从 5.02 提高到 5.31~5.61,较 CK 增加了 0.29~0.59 个单位。但施用 0.5 g/kg 调理剂,对土壤酸度的改善效果不明显。

2)施用 0.5、1.0 和 2.0 g/kg 调理剂,可以使土壤磷素有效性在磷肥施加后约 15~22、8~22、8~22 d 得到提高,延缓了土壤磷素固定速率。培养至第 15 天和第 22 天时,3 种水平施加量下,土壤有效磷含量分别提高了 34.54%、21.49%、24.17% 和 35.86%、22.09%、23.84%。

3)施加 0.5~2.0 g/kg 调理剂有效补充了土壤矿物质元素,使土壤有效钙、镁、硅含量分别增加了 6.85%~23.08%、16.17%~59.04%、16.35%~46.27%。

4)施加 0.5~2.0 g/kg 调理剂有利于促进植物营养吸收,使氮、磷、钾吸收量分别提高了 14.69%~44.26%、15.28%~52.89% 和 16.28%~42.43%,并且增产 10.47%~33.33%。其中,施入 1.0 g/kg 调理剂时,效果最佳。因此,农业应用中应控制调理剂施

加量，尽量避免土壤-植物系统内营养元素间的拮抗作用发生，而影响养分的吸收。

#### 参考文献：

- [1] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 641-648
- [2] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, et al. Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 2009-2015
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
- [4] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1240-1250
- [5] 国家技术监督局. 肥料和土壤调理剂术语: GB/T 6274—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- [6] 中华人民共和国农业部. 土壤调理剂效果试验和评价要求: NY/T 2271—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- [7] 韩小霞. 土壤结构改良剂研究综述[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(19): 110-112
- [8] 李兴平, 胡兆平, 刘阳, 等. 矿物型土壤调理剂研究综述[J]. 山东化工, 2016, 45(24): 48-50
- [9] Caires E F, Garbuio F J, Churka S, et al. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(1): 57-64
- [10] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 202-212
- [11] 魏莎, 李素艳, 孙向阳, 等. 土壤调理剂对连作切花菊品质和土壤性质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 206-211
- [12] 王洪凤, 吴钦泉, 谷端银, 等. 风化煤腐植酸对土壤理化性状的影响[J]. 腐植酸, 2014(6): 8-12
- [13] Chen G, Shi L. A multi-element mineral conditioner: A supplement of essential cations for red soil and crops growth[J]. Clean-Soil Air Water, 2016, 44: 1-10
- [14] 蒙园园, 石林. 矿物质调理剂中铝的稳定性及其对酸性土壤的改良作用[J]. 土壤, 2017, 49(2): 345-349
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2015
- [16] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J]. 土壤, 2017, 49(1): 49-56
- [17] 周细红, 曾清如, 蒋朝辉, 等. 尿素施用对土壤 pH 值和模拟温室箱内 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 浓度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 374-376
- [18] 鲁如坤, 赖庆旺. 红壤养分退化研究(II): 尿素和碳铵在红壤中的转化[J]. 土壤通报, 1995(6): 241-243
- [19] Yin P, Shi L. Remediation of Cd, Pb, and Cu-contaminated agricultural soil using three modified industrial by-products[J]. Water Air & Soil Pollution, 2014, 225(11): 2194
- [20] 徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 131
- [21] 李学垣. 土壤化学及实验指导[M]. 北京: 农业出版社, 1995
- [22] Chang S, Jackson M. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84(84): 133-144
- [23] 胡克伟, 颜丽, 关连珠. 土壤硅磷元素交互作用研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 230-233
- [24] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 2011(2): 1-9
- [25] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013: 136
- [26] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施——磷、氮、钾库重建措施[J]. 土壤, 2000, 32(6): 310-314
- [27] Lee Y B, Kim P J. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil[J]. Korean Journal of Environmental Agriculture, 2007, 26(4): 286
- [28] 徐照丽, 张晓海. 烤烟营养元素交互作用研究进展[J]. 西南农业学报, 2006, 19: 535-538
- [29] 朱从桦, 张嘉莉, 郭翔, 等. 硅磷肥配施提高四川春玉米的氮磷钾吸收和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1603-1611
- [30] 李贺, 刘世琦, 刘中良, 等. 钙对大蒜生理特性及主要矿物质元素吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3626-3634
- [31] 李中勇, 张媛, 韩龙慧, 等. 氮钙互作对设施栽培油桃叶片光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 893-900
- [32] 袁婷, 王正银, 谷守宽, 等. 低钾配施纳米氢氧化镁对白菜的营养效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 254-261
- [33] 汪本福, 黄金鹏, 赵锋, 等. 硅氮配施对水稻光合特性、叶绿素荧光及产量的影响[J]. 中国稻米, 2016(1): 30-34
- [34] Yang Y, Li J, Shi H, et al. Alleviation of silicon on low-P stressed maize (*Zea mays* L.) seedlings under hydroponic culture conditions[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4(2): 168
- [35] Kaya C, Tuna L, Higgs D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(8): 1469-1480

## Effects of Mineral Conditioner on Soil Nutrient Contents and Nutrient Absorption by Lettuce

GONG Lingting<sup>1</sup>, SHI Lin<sup>1,2\*</sup>, CAI Rumeng<sup>1</sup>

(1 *School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China*; 2 *Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters of Education, Guangzhou 510006, China*)

**Abstract:** Indoor culture and pot experiments were conducted to investigate the effects of nitrogen and phosphorus fertilizer combined with different dosages (0, 0.5, 1.0, and 2.0 g/kg) of mineral conditioner on pH, contents of available phosphorus, calcium, magnesium and silicon in soil as well as on lettuce yields and absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by lettuce. The results of indoor culture experiments showed that when the dosage of mineral conditioner was 1.0 g/kg and 2.0 g/kg, soil pH increased from 5.02 to 5.31 and 5.61, thus, enhanced soil anti-acidification ability. Meanwhile, the fixed rate of phosphate fertilizer applied to soil was delayed, the available phosphorus contents increased by 21.49% and 24.17% in 15d and 22.09% and 23.84% in 22d, respectively. The results of pot experiments showed that when the dosage of mineral conditioner was 0.5–2.0 g/kg, soil mineral nutrients were effectively increased, lettuce yields were increased by 10.47%–33.33%, and the uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium increased by 14.69%–44.26%, 15.28%–52.89% and 16.28%–42.43%, respectively. So, it is an effective way to apply mineral conditioner for ameliorating soil acidity, replenishing soil nutrients, and increasing crop nutrition absorption and yield.

**Key words:** Mineral conditioner; Soil nutrient; Available phosphorus; Nutrition absorption