

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 李国学

引用本文:

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 等. 磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2066–2073.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0186>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响

王书丽, 郭晓敏, 黄立君, 袁希, 董星宇, 肖斌, 方海富, 高宇, 牛德奎, 张令

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2089–2097 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0259>

土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律

项颂, 万玲, 庞燕

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 160–170 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0904>

太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响

高斌, 许有鹏, 王强, 杨洁, 沈顺忠, 徐兴

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1186–1191 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1511>

甬江流域土地利用方式对面源磷污染的影响: 基于SWAT模型研究

张招招, 程军蕊, 毕军鹏, 徐宇婕, 李昀, 王侃

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 650–658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0843>

基于GIS的红枫湖流域土地利用变化与水质响应

姜畅, 刘鸿雁, 陈竹, 饶程, 李政道, 杨通铨, 吴攀

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1232–1239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1598>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李丹阳, 亓传仁, 卫亚楠, 等. 磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2066–2073.

LI Dan-yang, QI Chuan-ren, WEI Ya-nan, et al. Study on the nutrient release characteristics and fertilizer efficiency of magnesium ammonium phosphate compost products[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 2066–2073.



开放科学 OSID

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 亓传仁, 卫亚楠, 李国学*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 为了研究磷酸铵镁堆肥产品的氮磷养分释放特性及其肥效, 分别采用土柱淋溶方法及盆栽试验研究了磷酸铵镁堆肥(MAPC)产品的氮磷养分释放特性及对油菜的肥效, 并与普通化肥(CCH)、普通堆肥(CCO)、磷酸铵镁肥(MAP)3种肥料进行对比。结果表明: 在整个淋溶过程中, CCH和MAPC处理淋溶液的总氮及总磷浓度均较其他处理高; MAP肥具有缓释性, 且堆肥对其养分释放具有促进作用; CCO处理的养分释放最慢。在最后一次淋洗(即第5次)后, 总氮及总磷养分浓度排序均为: CCH>MAPC>MAP>CCO。盆栽试验18 d后油菜快速生长, 且与对照(不施肥)处理相比, MAP和MAPC处理能显著提高油菜的株高及生物量。在45 d盆栽试验结束时, CCH、CCO、MAP和MAPC处理的生物量分别是对照处理的14.8、4.8、20.5倍和16.0倍。MAP处理能显著提高油菜的养分含量, TN和TP含量分别比对照提高了2.24 g·kg⁻¹和1.54 g·kg⁻¹。研究表明, 4种肥料均可改善油菜的生长发育情况, 且MAP和MAPC的肥效优于CCH和CCO, 在堆肥中利用鸟粪石结晶原理可固定部分氮磷元素, 提高堆肥产品肥效。

关键词: 磷酸铵镁堆肥产品; 土柱淋溶; 盆栽试验; 养分释放特性; 肥效

中图分类号: S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)09-2066-08 doi:10.11654/jaes.2020-0186

Study on the nutrient release characteristics and fertilizer efficiency of magnesium ammonium phosphate compost products

LI Dan-yang, QI Chuan-ren, WEI Ya-nan, LI Guo-xue*

(College of Resource and Environmental Science, China Agriculture University, Beijing 100093, China)

Abstract: Release characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients and fertilizer efficiency of magnesium ammonium phosphate compost products (MAPC) were studied. For the purpose, soil column leaching experiment was employed, and a pot experiment was conducted to assess the effects of the fertilizer efficiency on canola. Three fertilizers were used in the experiment: common chemical fertilizer (CCH), common compost (CCO), and magnesium ammonium phosphate (MAP), and the obtained results were compared. The results showed that during the entire leaching process, the concentrations of both total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the leachate treated with CCH and MAPC were higher than those in the other treatments. As a slow-release fertilizer, compost could improve the nutrient release of MAP and the nutrient release rate under CCO treatment was the lowest. Moreover, after the last leaching (i.e. the fifth), the TN and TP concentrations in the fertilizers were in the following order: CCH > MAPC > MAP > CCO. After 18 days of the pot experiment, it could be observed that canola grew rapidly. Compared with the control treatment, the MAP and MAPC fertilizers significantly improved the plant height and biomass of canola. At the end of the pot experiment (45 days), the biomass of canola under CCH, CCO, MAP, and MAPC treatments was 14.8, 4.8, 20.5, and 16.0 times higher than that under the control treatment, respectively. Furthermore,

收稿日期: 2020-02-23 录用日期: 2020-05-19

作者简介: 李丹阳(1994—), 女, 山西朔州人, 博士研究生, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: lidanyang@cau.edu.cn

*通信作者: 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

基金项目: 农业部、财政部现代农业产业技术体系建设专项(CARS-39-19)

Project supported: The Special Funds for Modern Agricultural Industry Technology System Construction of the Ministry of Agriculture and Finance of China (CARS-39-19)

compared with the control treatment, the MAP fertilizer had a significant effect on improving the nutrient content of canola, and the TN and TP contents were increased by $2.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In conclusion, four kinds of fertilizers selected for this study were beneficial in promoting the growth and development of canola. The fertilizer efficiency of the MAP and MAPC fertilizers was better than that of the CCH and CCO. Nitrogen and phosphorus could be conserved partially via struvite crystallization during composting and the fertilizer efficiency of compost product was improved.

Keywords: magnesium ammonium phosphate compost products; soil column leaching; pot experiment; nutrient release characteristics; fertilizer efficiency

施肥对于提高粮食产量和保持土壤肥力具有重要意义。近年来传统化肥的不合理施用,不仅造成肥料浪费,而且不能被作物吸收及土壤吸附固定的部分还会给环境带来一定的威胁。随着肥料科学的进步,除传统化肥外,二元、三元甚至多元化混成复合肥料,有机-无机复合肥,缓释肥及以不同原材料生产的废料肥品种层出不穷^[1]。适当增施有机肥或缓释肥可提高肥料利用率、延长肥效,也有利于提高土壤肥力、改良土壤性质等^[2]。将畜禽粪便经过堆肥方式制成有机肥是处理畜禽粪便最为有效和经济的方法之一,同时这也符合农业可持续发展的需要^[3]。堆肥中含有丰富的有机质及氮、磷、钾等多种营养元素,是一种经济有效的肥料资源。堆肥中含有多种微生物,将经过高温堆肥的有机肥施入土壤,可促进土壤有机质的分解和有效养分的释放,改善土壤理化性质,从而促进植物的生长和对营养物质的吸收^[4]。缓释肥指以各种调控机制使养分释放速率远小于速溶性肥料施入土壤后转变为植物有效态的养分释放速率,延长植物对其有效养分吸收利用有效期的肥料^[5],其中磷酸铵镁即鸟粪石是一种优良的缓释肥,被广泛应用于农业生产^[6-8]。Uysal等^[9]从工业发酵废水中回收磷酸铵镁进行玉米及番茄的盆栽试验,结果表明磷酸铵镁可作为肥料,且施肥量对植物鲜质量、干质量及营养元素吸收均有显著影响。Liu等^[10]用磷酸铵镁与速效磷肥-尿素进行玉米盆栽试验,结果显示磷酸铵镁处理组比速效磷肥-尿素处理组的产量平均增加14.4%。目前的研究主要是将鸟粪石结晶原理应用到堆肥中来控制氮素损失,以达到去除污染和回收资源的双重目的^[11-12],含有磷酸铵镁的堆肥产品是一种有机无机

复混肥,它兼具有机肥和无机肥的特点,有机部分养分不足且释放慢,无机部分是直接供应作物最主要的来源^[13]。

目前,普遍采用静水试验和土柱淋溶试验对肥料养分缓释性能和减少养分淋溶损失进行评价^[14],相对而言,考虑土壤因子的土柱淋溶法较静水法更为接近肥料在土壤中的实际情况^[15]。为了进一步研究堆肥产品对作物生物量和品质的影响,特别是氮素固定基础上形成的含有磷酸铵镁的堆肥产品其肥效还鲜有研究。本文通过土柱淋溶试验对磷酸铵镁堆肥产品的氮磷养分释放特性和养分淋溶损失控制效果进行研究,同时采用盆栽试验对油菜生长发育期的生物量及养分含量等进行测试来评价其肥效,并与普通化肥、普通堆肥、磷酸铵镁肥3种肥料进行对比,从而达到反证利用鸟粪石结晶原理在原位降低堆肥氨气损失、减少臭气排放、提高氮磷营养元素含量、提高堆肥产品肥效方面的效果,为磷酸铵镁相关肥料的研究及合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自中国农业大学上庄试验站,采样深度0~20 cm,风干去除土中杂物,研磨过2 mm筛,备用,土壤特性见表1。供试肥料为4种,分别为普通化肥(CCH,尿素+过磷酸钙+氯化钾)、磷酸铵镁肥(MAP)、普通堆肥(CCO)和含有磷酸铵镁的堆肥(MAPC),其中普通化肥和磷酸铵镁肥购自市场,普通堆肥和含有磷酸铵镁的堆肥均来自于前期的堆肥试验。堆肥试验利用猪粪和玉米秸秆为堆肥原料,

表1 土柱淋溶及盆栽试验供试土壤特性

Table 1 Basic characteristics of soil used in the soil column leaching and pot experiments

容重 Bulk density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH	电导率 Electrical conductivity/ ($\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$)	有机质 Organic matter/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available nitrogen/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 Total potassium/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1.30	8.07	15.74	24.91	0.90	30.71	10.00	22.60

用尿素调节初始物料碳氮比到 15, 普通堆肥产品来源于未进行氮素损失控制的对照处理, 含有磷酸铵镁的堆肥产品来源于以分析纯 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 摩尔比为 1:2 为调理剂的处理。将两处理的原料在 60 L 的密闭堆肥化装置中进行高温好氧堆肥, 采用机械强制连续通风, 通风量控制在 $0.084\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$, 堆制 26 d。4 种肥料的养分含量见表 2, 且以不施肥为对照 (CK) 处理。

1.2 试验设计

1.2.1 土柱淋溶试验

土柱淋溶试验装置为直径 5 cm、高 30 cm 的 PVC 圆柱管, 在其底部设置一个出水口, 用来收集淋溶液。首先用 200 目滤布封底, 并在滤布上垫有约 25 g 石英砂以起过滤水样的作用, 为了模拟上庄试验站的土壤耕层, 按 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的容重装入 400 g 土壤。4 种肥料的施肥量为施 N $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。除 CK 外, 保证各处理的初始氮、磷、钾施加量一致, 磷肥全部来自于肥料, 氮不足用尿素补足, 钾肥不足用氯化钾补足, 具体施肥量如表 3 所示。将不同肥料分别与风干土壤混合后按 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的容重装入 100 g, 土柱上面再加 25 g 石英砂覆盖以防止加水时扰乱土层。在安装土柱时, 要尽量将土柱壁附近的土壤压实以防漏水流出, 土柱最下方放置一个布氏漏斗, 用 250 mL 锥形瓶承接淋溶液, 试验装置如图 1 所示。

先加 250 mL 蒸馏水使土壤水分接近饱和, 之后进行第一次土柱淋溶, 缓慢倒入 100 mL 蒸馏水淋溶土柱, 收集 24 h 内的淋溶液, 收集完淋溶液后用刺有小孔的塑料薄膜封住 PVC 管的上口以防水分大量蒸发, 并放置在 30 ℃ 培养箱中培养 3 d。再用 100 mL 蒸馏水进行第二次淋溶, 以后各次按同样操作进行, 共



图 1 土柱淋溶试验装置

Figure 1 The equipment of soil column leaching experiment

淋溶 5 次, 即分别在第 1、5、9、13、17 d 淋溶土柱。以不加肥料的土柱作为对照, 每个处理重复 3 次, 测定淋溶液的体积、pH、EC、总氮及总磷含量。

1.2.2 盆栽试验

盆栽试验土壤来自于中国农业大学上庄试验站, 属粉砂质潮土, 采样深度 0~20 cm, 容重 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。盆栽试验装置为直径 20 cm、高 45 cm 的塑料盆, 每盆装

表 3 土柱淋溶试验中各处理的施肥量

Table 3 The amount of fertilizer application under different treatments in soil column leaching experiment

处理 Treatments	施肥量 The amount of fertilizer application
CK	0
CCH	尿素 256.0 mg, 过磷酸钙 519.5 mg, 氯化钾 62.4 mg
CCO	普通堆肥 1 346.2 mg, 尿素 177.5 mg, 氯化钾 27.3 mg
MAP	磷酸铵镁肥 321.1 mg, 尿素 217.6 mg, 氯化钾 62.4 mg
MAPC	含有磷酸铵镁的堆肥 742.0 mg, 尿素 191.5 mg, 氯化钾 44.0 mg

表 2 供试肥料的养分含量(%)

Table 2 Nutrient content of different fertilizers used in the experiments(%)

处理 Treatments	肥料种类 Fertilizer species	N 含量 Nitrogen content	P_2O_5 含量 Phosphorus pentoxide content	K_2O 含量 Potassium oxide content	MgO 含量 Magnesium oxide content
CK	不施肥 No fertilizer	0	0	0	0
CCH	普通化肥 (尿素+过磷酸钙+氯化钾) Common chemical fertilizer (urea+superphosphate+potassium chloride)	46.00	17.00	62.94	0
CCO	普通堆肥 Common composting product	2.68	6.56	1.64	0
MAP	磷酸铵镁肥 MAP fertilizer	5.50	27.50	0	15.00
MAPC	含有磷酸铵镁的堆肥 MAPC fertilizer	4.00	11.90	1.56	—

注:—表示未测定。
Note:— means not measured.

表4 盆栽试验中各处理的施肥量

Table 4 The amount of fertilizer application under different treatments in pot experiment

处理 Treatments	施肥量 The amount of fertilizer application
CK	0
CCH	尿素 4.10 g, 过磷酸钙 8.31 g, 氯化钾 1.00 g
CCO	普通堆肥 21.54 g, 尿素 2.84 g, 氯化钾 0.44 g
MAP	磷酸铵镁肥 5.14 g, 尿素 3.48 g, 氯化钾 1.00 g
MAPC	含有磷酸铵镁的堆肥 11.87 g, 尿素 3.06 g, 氯化钾 0.70 g

入 16.33 kg 土壤,土高约 40 cm,在高度 35 cm 处施肥,以“绿锦一号”油菜为供试植物,每盆 5 株。如表 4 所示,试验共设 5 个处理,每个处理重复 5 次,施肥量按照 $N\ 600\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 450\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 200\ kg\cdot hm^{-2}$ 。除对照(CK)外,保证各处理的初始氮、磷、钾施加量一致,磷肥全部来自于肥料,氮肥不足用尿素补足,钾肥不足用氯化钾补足,实验持续 45 d,期间不再追肥。根据盆中土壤水分情况定量浇水,保持土壤相对含水率在 40%~80%,每盆浇水量相同。记录作物生长情况,分别在第 8、18、28、38、45 d 测定作物的生理指标(株高、生物量),试验结束后测定油菜植株的营养状况,以研究不同肥料对油菜生物量和品质的影响。

1.3 测定方法

1.3.1 土柱淋溶试验

淋溶液体直接用量筒测定。pH 和电导率(EC)分别用 S-3C 型 pH 计和 DDS-12A 数字电导仪测定。总氮含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[16],总磷采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定。

1.3.2 盆栽试验^[17]

株高:地面到植株心叶的距离。

植株鲜质量/生物量:将植株清洗干净,吸水纸吸干水分后,直接称量每株植物的质量并取平均值。

植株干质量:将新鲜植株洗净吸干水分后按部位分装入牛皮纸袋中,在 105 ℃ 下杀青 30 min,在 70 ℃ 下烘干至恒质量,然后称其干质量并取平均值。

叶片数:计数每株的叶片数,取其平均值。

植株全氮、全磷含量:将烘干的样品粉碎后过 0.02 mm 筛,硫酸-过氧化氢消化,凯氏定氮法测定全氮含量、钒钼黄比色法测定全磷含量。

1.4 分析方法

数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,各处理间的差异显著性采用单因素方差分析,显著性水平为 0.05,作图使用 Origin 8.5 软件。

2 结果与讨论

2.1 土柱淋溶试验中肥料的养分释放特性

2.1.1 pH

淋溶液 pH 可以反映液体酸碱度的变化,如图 2 所示。CCO 和 CCH 处理的淋溶液 pH 在前两次淋溶中均呈下降趋势,这可能与堆肥中可溶性有机酸和过磷酸钙均呈酸性有关,在前两次淋溶过程中, H^+ 被淋洗出来,故 pH 有所降低,之后逐渐上升。总体上,各处理的 pH 变化不明显,均在 8.0 左右,各处理间差异也不显著($P=0.058$)。

2.1.2 EC

如图 3 所示,淋溶液的 EC 随着淋溶次数的增加呈下降趋势,说明淋溶次数越多,淋洗出的离子浓度越低,淋洗出的营养成分呈下降趋势,这与王燕等^[18]用土柱模拟研究北京郊区砂土持水力及淋溶特性所得结果一致。到第 5 次淋溶时,各处理的 EC 基本稳定,且均在 $3\ mS\cdot cm^{-1}$ 以下。另外,在施加肥料的各处理中,CCH 处理的 EC 在各次淋溶中均为最大,CCO 处理的 EC 最小,这是由于化肥处理中施加的尿素、过磷酸钙和氯化钾都属于水溶性速效肥,可溶性盐离子浓度较高,而普通堆肥经过升温、高温、降温及腐熟 4 个阶段后,可溶性离子及小分子有机酸逐渐被大分子腐殖质所替代,所以 EC 较低。

2.1.3 总氮

图 4 为淋溶液中总氮浓度的变化,由图可知,在各次淋溶中,施加肥料处理的总氮浓度均比 CK 的要大,这是因为施肥能不同程度地提高土壤中氮素含量。除 CK 处理外,其他各处理的总氮浓度均在第 3 次达到最大,这与第 3 次淋溶液体体积较少有关,CCH、CCO、MAP 及 MAPC 处理淋溶液的总氮浓度分别比 CK 高 1.29 、 0.97 、 $1.15\ mg\cdot L^{-1}$ 和 $1.37\ mg\cdot L^{-1}$,之后总氮浓度逐渐下降。在试验结束时,总氮浓度排序为 $CCH>MAPC>MAP>CCO$ 。在整个淋溶过程中,CCH 和 MAPC 处理的总氮浓度较其他处理高;MAP 处理次之,这可能与磷酸铵镁肥的缓释性有关,这与孔殿超^[19]得出的磷酸铵镁氮、磷元素淋溶量明显低于其他商业肥结论一致;CCO 处理的总氮浓度均较其他施肥

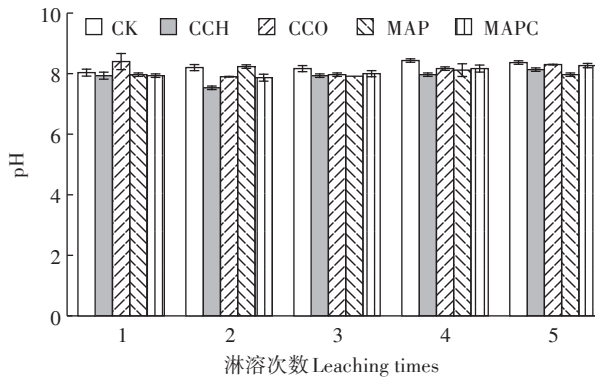


图2 不同处理淋溶液pH变化

Figure 2 Changes of pH value in leachate under different treatments

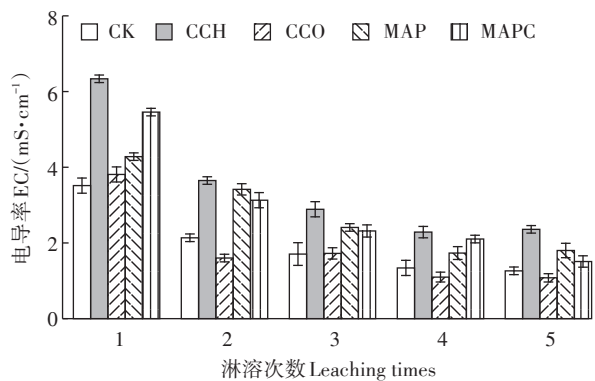


图3 不同处理淋溶液EC变化

Figure 3 Changes of EC in leachate under different treatments

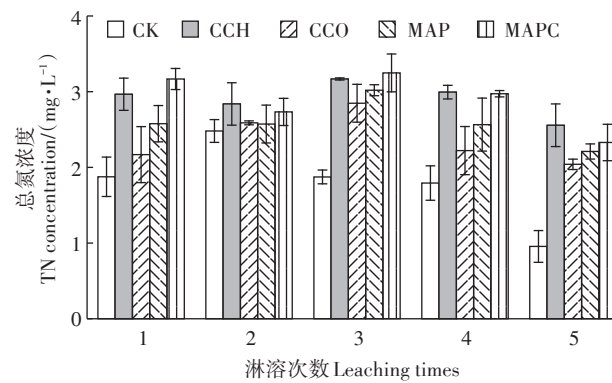


图4 不同处理淋溶液总氮浓度变化

Figure 4 Changes of TN concentration in leachate under different treatments

处理低。

2.1.4 总磷

如图5所示,CK处理总磷浓度均比施加肥料的处理低,这是因为施肥能不同程度地提高土壤中磷素含量。在第3次淋溶中,各处理淋溶液的总磷浓度均

最高,且由大到小排序为MAPC($3.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>CCH($3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>MAP($3.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>CCO($3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这是由于第3次各处理的淋溶液体积最小。与总氮浓度情况一致,在试验结束时,总磷浓度排序为CCH>MAPC>MAP>CCO。在整个淋溶过程中,CCH和MAPC处理的总磷浓度较其他处理高,MAPC处理的总磷浓度高可能是因为堆肥中存在的大量有机酸具有活化磷的作用^[20],从而使该处理含有较高的速效磷含量;MAP的缓释性使其具有良好的环境效应,磷素释放缓慢且不易被淋洗,从而呈现出较低的磷浓度^[21];CCO处理的总磷浓度较其他施肥处理低,和CK处理的总磷浓度差异不显著($P>0.05$)。

2.2 盆栽试验中肥料的生物效应

2.2.1 不同施肥处理对油菜株高的影响

如图6所示,油菜株高随着生育期的延长而增大,在试验前期(0~18 d),各处理之间的株高差异不显著,18 d之后差异逐渐增大($P=0.037$),CK在整个生育期的株高都小于其他施肥处理,由此可知肥料对植物的生长发育影响很大。比较不同施肥处理可以发现,CCO处理的株高小于其他3个处理,这与有机肥肥效慢,在淋溶过程中总氮和总磷浓度均较低有关。CCH虽然属于速效肥,但营养成分容易随水淋溶流失,而其在最后7 d的株高明显增长,从13.4 cm增加到20.8 cm,涨幅为55.2%,这可能与其营养成分累积到一定程度有关。施加MAPC的处理从第18 d后一直保持株高方面的优势,这可能是由于堆肥中含有的有机酸对磷酸铵镁的溶解有促进作用,使其分解产生大量的铵态氮和速效磷;MAP处理次之,这可能与油菜喜镁(Mg)有关^[22]。统计分析结果表明,18 d后,处理CCH和CCO与CK之间的差异不显著,而

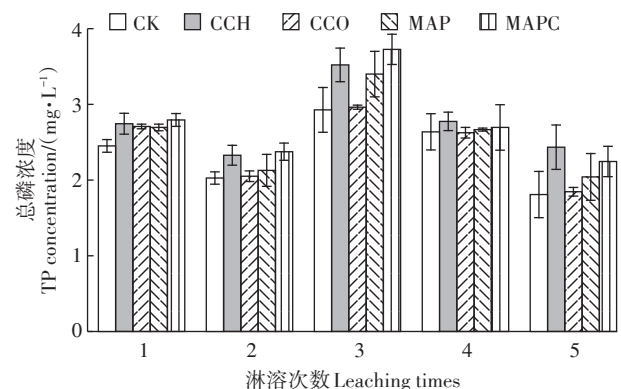


图5 不同处理淋溶液总磷浓度变化

Figure 5 Changes of TP concentration in leachate under different treatments

MAP 和 MAPC 处理的株高则与 CK 差异显著 ($P=0.017$, $P=0.005$)。盆栽试验结束时,施肥处理 CCH、CCO、MAP 和 MAPC 的株高分别比 CK 高 84.0%、50.0%、71.4% 和 86.5%。

2.2.2 不同施肥处理对油菜鲜质量的影响

如图 7 所示,各处理的植株鲜质量随着生育期的延长而增加。在 0~18 d 内,CCH 处理的鲜质量最高,18 d 以后各处理的差异逐渐显著,CK 处理的鲜质量明显低于施肥处理,可以看出肥料对于作物生长发育的重要性,这也与供试土壤肥力低有关。CCO 处理的植株鲜质量高于 CK,但明显低于其他施肥处理,这与株高反映出的特征一致,说明作为肥料其有效养分含量低、速效性较差。CCH 处理植株鲜质量高于 CCO 处理,但小于 MAP 和 MAPC 处理,主要是由于 CCH 是速效肥,在生长初期能及时供应植物生长所需养分,但在 45 d 的生长周期内,养分很容易随水流失,这与程冬冬^[17]用油菜进行盆栽试验所得结论相似。MAP 处理在 38 d 后鲜质量上升趋势明显,单株鲜质量从

4.9 g 上升到 13.3 g,这可能与其中含有 Mg 元素及其后期养分的逐步释放有关。MAPC 处理从 18~38 d 其植株鲜质量的上升幅度都较其他处理高,38 d 以后鲜质量增加幅度趋于稳定,这与其养分释放较为稳定有关。

18 d 后处理间的差异显著性分析表明,处理 CCH 和 CCO 与 CK 之间的差异不显著,而 MAP 和 MAPC 两处理均与 CK 差异显著 ($P=0.041$, $P=0.018$);MAPC 与 CCO 处理相比差异显著 ($P=0.046$),说明 MAPC 的生物效应明显优于 CCO。试验结束时,CCH、CCO、MAP 和 MAPC 处理的单株鲜质量分别是 CK 处理的 14.8、4.8、20.5 倍和 16 倍。

2.2.3 不同肥料处理对油菜干质量的影响

试验期间,各处理的外界环境一致,因此油菜中干物质的积累主要受施肥影响。从图 8 可以看出,干物质的积累随着生育期的延长而呈上升趋势,18 d 后各处理的干物质积累速度加快并显示出差异,CK、CCH、CCO、MAP 和 MAPC 处理的单株干质量分别从 0.011、0.022、0.01、0.024 g 和 0.022 g 上升到 0.06、0.50、0.21、0.63 g 和 0.69 g,干物质积累比例占整个生长期的 81.5%、95.5%、94.4%、96.2% 和 96.8%,施肥处理均比 CK 处理的植株干质量大,说明施肥可以促进油菜干物质的累积。差异显著性分析结果表明,MAP 和 MAPC 处理与 CK 差异显著 ($P=0.043$, $P=0.009$),但 CCH 和 CCO 与 CK 之间差异不显著,MAPC 和 CCO 处理之间差异显著 ($P=0.025$)。试验结束时,各施肥处理 CCH、CCO、MAP 和 MAPC 的单株干质量分别为 CK 处理的 8.3、3.5、10.5 倍和 11.5 倍,可知从油菜干质量指标来看,各肥料的肥效表现为 MAPC>MAP>CCH>CCO。

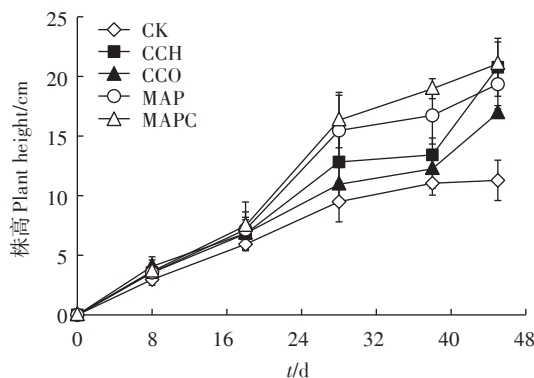


图 6 施用不同肥料后油菜的株高变化

Figure 6 Changes of height of canola under different fertilization

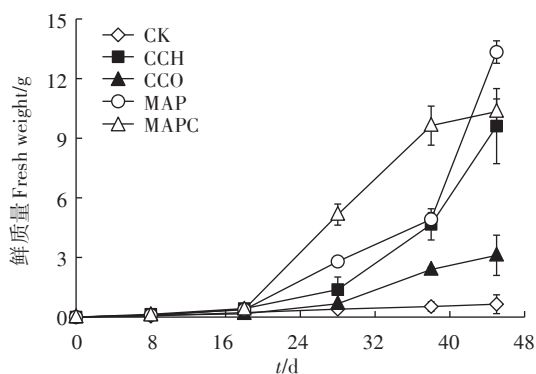


图 7 施用不同肥料后油菜的鲜质量变化

Figure 7 Changes of fresh weight of canola under different fertilization

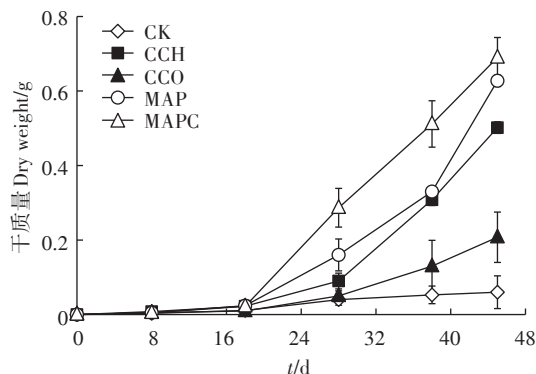


图 8 施用不同肥料后油菜的干质量变化

Figure 8 Changes of dry weight of canola under different fertilization

2.2.4 试验结束时不同施肥处理下的油菜生物性状表现

试验结束时,不同施肥处理下油菜的生物性状见表5,由表可知,施用肥料可不同程度地提高油菜的生物量及养分含量,说明4种肥料均具有增产增效的作用。在试验结束时,施用MAP和MAPC处理的油菜生物量、植株总氮及总磷含量均较CCH和CCO处理高。MAPC处理与CK和CCO处理相比,在叶片数、株高、生物量上都表现出了明显的优势,说明在堆肥中利用鸟粪石结晶原理可实现原位降低氨气损失、减少臭气排放、提高堆肥产品肥效。MAPC产品应用于短期作物时,可以显著改善作物的生物性状,提高作物的生物量,这与王海滨^[23]所得研究结论一致,施用效果与CCH相近,从理论上可以代替化肥。此结果为提高该肥料的市场价格和推广应用提供了理论依据。

油菜中累积的营养成分分析表明,MAP虽然养分释放速度慢,但与其他处理相比,其对于提高油菜的营养价值具有显著作用,MAP处理的植株总氮含量分别比CK、CCH、CCO和MAPC处理提高了2.24、1.91、2.11 g·kg⁻¹和1.69 g·kg⁻¹,总磷含量分别提高了1.54、1.44、1.52 g·kg⁻¹和1.40 g·kg⁻¹。

3 结论

(1)在土柱淋溶试验中,与CK相比,施加肥料均能提高淋溶液的总氮和总磷浓度;在盆栽试验中,与CK相比,所有施肥处理均可不同程度地改善油菜的生长发育情况。

(2)各处理的pH在淋溶过程中变化不大,EC随淋溶次数的增加呈逐渐下降的趋势。在整个淋溶过程中,施加普通化肥和磷酸铵镁堆肥处理的总氮及总磷浓度均较其他处理高;磷酸铵镁的缓释性使其具有良好的环境效应,氮素、磷素释放缓慢且不易被淋洗,

另外堆肥对磷酸铵镁养分释放具有促进作用;普通堆肥处理在整个土柱淋溶过程中,其总氮、总磷浓度均比其他施肥处理低,养分释放最慢。经5次淋溶后,总氮及总磷浓度排序均为CCH>MAPC>MAP>CCO。

(3)磷酸铵镁肥和磷酸铵镁堆肥产品的肥效优于普通化肥和普通堆肥产品,鸟粪石结晶原理在固定堆肥氮磷元素、提高堆肥产品肥效方面效果良好。普通化肥比普通堆肥养分释放快,单施有机肥会使作物前期养分供应不足,影响作物生长发育,所以应和其他肥料配合施用。

参考文献:

[1] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
YANG Jian-hong, WANG Cheng-lin, DAI Heng-lin. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008.

[2] 孙宁科,索东让.有机肥与化肥长期配施对作物产量和灌漠土养分库的影响[J].水土保持通报,2011,31(4):42-46.
SUN Ning-ke, SUO Dong-rang. Effects of long-term mixed use of organic manure and chemical fertilizers on crop yield and indigenous soil nutrients[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 42-46.

[3] Onwosi C O, Igbokwe V C, Odimba J N, et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190(4): 140-157.

[4] 李丽君.长期施用堆肥对曲周农田土壤健康影响[D].北京:中国农业大学,2017.
LI Li-jun. Effects of long-term compost application on soil health in Quzhou Station[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.

[5] 林清火,刘海林,黄艳艳,等.4种缓控释氮肥的养分释放特征及肥效[J].热带作物学报,2018,39(9):1718-1723.
LIN Qing-huo, LIU Hai-lin, HUANG Yan-yan, et al. Release characteristics and fertilizer efficiency of coated controlled-release nitrogen for rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(9): 1718-1723.

[6] Ryu H D, Lee S I. Struvite recovery from swine wastewater and its assessment as a fertilizer[J]. *Environmental Engineering Research*, 2016,

表5 试验结束时各处理的植株生物性状

Table 5 Biological characters of canola under different fertilization at the end of the experiment

处理 Treatments	叶片数 Leaf number/(片·株 ⁻¹)	株高 Plant height/(cm·株 ⁻¹)	生物量 Plant biomass/(g·株 ⁻¹)	植株总氮含量 TN content of plant/(g·kg ⁻¹)	植株总磷含量 TP content of plant/(g·kg ⁻¹)
CK	5.75b	11.29c	0.65d	2.70c	0.91b
CCH	8.75a	20.77a	9.61b	3.03b	1.01b
CCO	6.00b	16.93b	3.11c	2.83c	0.93b
MAP	7.30ab	19.35ab	13.34a	4.94a	2.45a
MAPC	7.67a	21.06a	10.34ab	3.25b	1.05b

注:同列不同小写字母表示不同处理在5%水平下差异显著。
Note: Data followed by different lowercase letters within the same column means significant different ($P<0.05$).

- 21(1):29-35.
- [7] Ryu H D, Lim C S, Yu K K, et al. Recovery of struvite obtained from semiconductor wastewater and reuse as a slow-release fertilizer[J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29(6):540-548.
- [8] Antonini S, Arias M A, Eichert T, et al. Greenhouse evaluation and environmental impact assessment of different urine-derived struvite fertilizers as phosphorus sources for plants[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(10):1202-1210.
- [9] Uysal A, Demir S, Sayilgan E, et al. Optimization of struvite fertilizer formation from baker's yeast wastewater; Growth and nutrition of maize and tomato plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(5):3264-3274.
- [10] Liu Y H, Rahman M M, Kwag J H, et al. Eco-friendly production of maize using struvite recovered from swine wastewater as a sustainable fertilizer source[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2011, 12:1699-1705.
- [11] Jiang T, Ma X G, Tang Q, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH_3 and N_2O emissions during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217(10):210-218.
- [12] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200(1):838-844.
- [13] 俞海平, 俞镇浩. 5种不同工艺肥料的养分释放特性[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(11):1961-1964, 1973.
- YU Hai-ping, YU Zhen-hao. Nutrient release characteristics of five different fertilizers[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(11):1961-1964, 1973.
- [14] 侯翠红. 控制释放肥料养分释放特性的研究[J]. 磷肥与复肥, 1998(4):6-8.
- HOU Cui-hong. Study on nutrient release characteristics of controlled-release fertilizers[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 1998(4):6-8.
- [15] Shamiv A, Middelsen R L. Controlled release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental problems via controlled release styrene butadiene rubber formulations containing applications ammonium nitrate[J]. *Plastic Rubber and Composites Processing*, 1993, 19(2):111-115.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000.
- [17] 程冬冬. 高分子缓/控释肥的养分释放特征及应用[D]. 太原:中北大学, 2015.
- CHENG Dong-dong. Study on nutrient release characteristics and the application effect of polymeric slow/controlled release fertilizer[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [18] 王燕, 庞卓, 贾月, 等. 生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1820-1828.
- WANG Yan, PANG Zhuo, JIA Yue, et al. Effects of biochar on water holding capacity and nitrogen leaching of sandy soil column from a Beijing suburb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1820-1828.
- [19] 孔殿超. 鸟粪石沉淀法产物性质及其资源化利用的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2011.
- KONG Dian-chao. Study on character and resource utilization of products made by struvite precipitation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- [20] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机无机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社, 2000:47-52.
- LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and production of organic and inorganic compound fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000:47-52.
- [21] 倪志强, 周爽, 陆鹏, 等. 磷酸铵镁结晶技术与肥料化利用[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(11):13-16.
- NI Zhi-qiang, ZHOU Shuang, LU Peng, et al. Crystallization technology of magnesium ammonium phosphate and potential use in fertilizer industry[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2015, 30(11):13-16.
- [22] 田贵生, 陆志峰, 任涛, 等. 镁肥基施及后期喷施对油菜产量与品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5):85-90.
- TIAN Gui-sheng, LU Zhi-feng, REN Tao, et al. Effects of spraying magnesium on the yield and quality of oilseed rape under different magnesium fertilizer application rates[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(5):85-90.
- [23] 王海滨. 生物有机无机复合肥对蔬菜产量、品质及土壤性质的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- WANG Hai-bin. Effect of biological-organic complex fertilizer on the yield, quality and soil properties of vegetables[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.