

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.11.004

彭秋, 徐卫红. 纳米缓释肥氮素释放特性及茎瘤芥营养效应研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(11): 31-41.

纳米缓释肥氮素释放特性及茎瘤芥营养效应研究

彭秋^{1,2}, 徐卫红¹

1. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400715; 2. 四川省富顺县农产品质量安全监管中心, 四川 自贡 643000

摘要: 重庆涪陵茎瘤芥产区因过量施肥、偏施氮肥导致茎瘤芥产量和品质下降、土壤酸化和环境污染日趋严重。根据茎瘤芥需肥规律和产区土壤肥力水平, 研制了生化缓释(氢醌、N-丁基硫代磷酸三胺和双氰胺)和物理缓释(纳米沸石)相结合的一种新型缓释肥, 采用“通气法”和“好气培养-间歇淋洗法”研究肥料的氮挥发速率、氮挥发总量和氮素释放特性, 并采用土培试验研究其对茎瘤芥产量、氮磷钾养分利用率的影响。结果表明: 茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)能降低肥料的氮挥发速率和氮挥发总量。NBSRF的氮挥发总量较商品专用肥(MZF)、普通复合肥(OCF)、自制专用肥(BCF)和自制缓释肥(BSRF)降低了 41.20%, 26.59%, 23.57% 和 9.78%。NBSRF 缓释期大约为 70 d, 总氮累积溶出率为 89.74%。在培养期内(第 21 d), 各处理的总氮累积溶出率由大到小依次为 OCF, MZF, BCF, BSRF, NBSRF, 商品缓释肥(MSRF)。盆栽试验中, 茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)的茎生物量(永安小叶和涪杂 2 号)比 OCF 和 MSRF 分别增加了 2.70%~3.80% 和 7.26%~9.54%; 与 OCF 相比, NBSRF 的氮肥表观利用率分别提高了 10.05% 和 4.41%。

关键词: 纳米缓释肥; 茎瘤芥; 氮挥发; 氮素释放; 养分利用率

中图分类号: S145.6 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)11-0031-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Nano-Slow-Release Fertilizer Increase Quality and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Nutrient Utilization Rate of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee

PENG Qiu^{1,2}, XU Weihong¹

1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Fushun County Agricultural Products Quality and Safety Supervision Center, Zigong Sichuan 643000, China

Abstract: Excessive application of fertilization and nitrogen fertilizer not only reduced the production and

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 财政部和农业农村部 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10); 国家重点研发计划项目(2018YFD0201200)。

作者简介: 彭秋, 硕士研究生, 主要从事植物营养与环境生态研究。

通信作者: 徐卫红, 博士, 教授。

quality of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee, but also brought serious soil acidification and environmental pollution. According to the nutrient requirement of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee and the soil fertility, a new type of sustained release fertilizer combining biochemical sustained release (hydroquinone, N-butylphosphotriamine and dicyandiamide) and physical sustained release (nano zeolite) was developed. The rate and total amount of ammonia volatilization, and nitrogen release properties of special nano slow-release fertilizer (NBSRF) were studied. The pot culture test was conducted to study its effect on production and nitrogen, phosphorus and potassium utilization of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee. The results showed that nano slow-release fertilizer (NBSRF) reduced the rate and the total amount of ammonia volatilization. The total apparent ammonia volatilization of NBSRF was 41.20%, 26.59%, 23.57%, and 9.78% lower than that of commercial special fertilizer (MZF), common compound fertilizer (OCF), our special fertilizer (BCF) and slow-release fertilizer (BSRF), respectively. The release period of NBSRF was approximately 70 days, and the cumulative total nitrogen dissolution rate was 89.74%. During the culture period, the order of total nitrogen cumulative dissolution rate of different treatments was OCF, MZF, BCF, BSRF, NBSRF, MSRF. The stem biomass of nano-slow-release fertilizer (NBSRF) increased by 2.70% to 3.80% and 7.26% to 9.54% over common compound fertilizer (OCF) and commercial slow-release fertilizer (MSRF), respectively. Nitrogen utilization rate of NBSRF improved by 10.05% and 4.41% compared to OCF, respectively.

Key words: nano-slow-release fertilizer; *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee; ammonia volatilization; nitrogen release; nutrient utilization rate

长江上游重庆涪陵地区是我国最大的茎瘤芥种植区,有上百年的茎瘤芥栽培历史,是当地冬季主要的栽培作物.随着茎瘤芥产业的发展,重庆市涪陵榨菜产区在茎瘤芥栽培过程中存在着过量施肥、偏施氮肥的问题,不仅增加了茎瘤芥的生产成本,降低了茎瘤芥的产量和品质,也导致土壤酸化和环境污染等问题日趋严重^[1-5].杨丽丽^[1]对涪陵茎瘤芥核心种植区的调研发现,农户在茎瘤芥种植过程中氮肥、磷肥和钾肥的平均用量每 667 m² 分别为 32.43 kg, 7.33 kg 和 6.04 kg,该氮磷施肥水平大大超过了姚磊^[2]提出的茎瘤芥推荐施肥量(每 667 m² 氮为 20 kg,磷为 6 kg,钾为 10 kg).李忠意^[3]通过对涪陵区榨菜产区 283 个土壤样品分析发现,土壤 pH 值小于 6.5 的酸性土壤占调查总数的 61.48%,而 pH 值小于 5.5 的强酸性土壤占调查总数的 52.30%.土壤酸化不仅使茎瘤芥减产,而且造成土传病害越来越严重^[4].

在众多肥料种类中,缓释肥因其养分释放规律与作物养分吸收特点相吻合,可提高肥料利用率及作物产量品质,且对环境友好,也被称为“环境友好型新型肥料”,是近年来肥料研究的热点^[6].目前国内的缓释肥主要有物理缓释(包膜、包裹)、化学缓释(化学反应)、生化缓释(抑制剂)3 大类.化学缓释、生化缓释一般成本很高且常常具有副作用;包膜、包裹的物理缓释肥具有成本低、来源广等特点,在农业生产上具有较好的应用前景^[7].适合用于生产基质缓释肥的材料有沸石、膨润土、蛭石、木质素、淀粉和风化煤等^[8-10].

纳米缓释肥是利用纳米材料对养分进行包裹或者包膜,以降低养分释放速率的一类缓释肥料,属于物理缓释肥^[11-16].近年来的研究发现一些黏土矿物当粒径减小到 100 nm 后其吸附性能会大大增强,利用该材料与肥料经过一定的加工工艺后制成纳米缓释肥,肥料养分释放速率会大大降低^[10].李旭霞等^[9]在水稻上的研究发现,利用纳米膨润土包膜尿素可以在产量不降低的同时氮肥利用率提高 2.8%~20.6%.纳米 SiO₂-聚乙烯醇- γ -聚谷氨酸复合物包膜肥料能将肥料养分在 35 d 的释放量从 58.5%降低到 48.3%,在油菜上的应用发现,纳米包膜肥料可以使油菜产量提高 11.6%,氮肥利用率提高 18.9%^[16].虽然有大量的研究

显示纳米肥料能促进植物生长, 提高作物产量和品质, 但也有报道显示纳米肥料可能会对作物生长产生不良的影响^[17]. 这可能与纳米材料的种类、浓度有关, 也可能与作物种类、品种和生长阶段有关, 同时还受环境调节等诸多因素的影响^[16-17].

本研究的产品是生化缓释(氢醌、N-丁基硫代磷酰三胺和双氰胺)和物理缓释(纳米沸石)相结合的一种新型缓释肥^[18-19]. 该新型缓释肥根据茎瘤芥的需肥规律和产区土壤肥力水平研发而成, 采用“通气法”和“好气培养-间歇淋洗法”研究了该新型肥料的氮挥发速率、氮挥发总量及氮素释放特性, 并结合土培试验研究了该新型肥料对茎瘤芥产量及营养效应的影响, 以为新型缓释肥的研发和应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

普通沸石购于巩义市蓝之润净水材料销售有限公司, 粒径约为 150 μm . 纳米沸石购于湖北申县环保新材料有限公司, 粒径为 50~100 nm. 试验茎瘤芥(*Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee)品种为永安小叶和涪杂 2 号, 为涪陵地区茎瘤芥的主栽品种, 2018 年 9 月 5 日播种, 10 月 25 日移栽, 苗龄 50 d.

自制专用肥(BCF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 16-6-12. 根据茎瘤芥需肥规律和涪陵榨菜产区土壤肥力水平研发, 氮素形态包括铵态氮、硝态氮和酰胺态氮, 配方中添加了 7% 普通沸石. 自制缓释肥(BSRF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 16-6-12, 在 BCF 配方基础上添加脲酶抑制剂(氢醌和 N-丁基硫代磷酰三胺)和硝化抑制剂(双氰胺). 茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 16-6-12, 养分配方与 BSRF 相同, 添加脲酶抑制剂(氢醌和 N-丁基硫代磷酰三胺)和硝化抑制剂(双氰胺), 配方中添加 7% 纳米沸石. 商品专用肥(MZF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 12-6-7; 普通复合肥(OCF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 15-15-15; 商品缓释肥(MSRF), 养分(氮-磷-钾)质量分数(%): 22-8-12, 为重庆涪陵地区茎瘤芥种植过程中普遍使用的肥料, 购于当地农资公司.

供试土壤采自西南大学紫色土基地, 土壤 pH 值为 7.29, 有机质 10.32 g/kg, 全氮 0.63 g/kg, 碱解氮 56.16 mg/kg, 有效磷 20.93 mg/kg, 速效钾 98.28 mg/kg.

1.2 试验设计

1.2.1 氮素释放特性研究

共设 7 个处理, 分别为不施肥(CK)、商品专用肥(MZF)、普通复合肥(OCF)、商品缓释肥(MSRF)、自制专用肥(BCF)、自制缓释肥(BSRF)和茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF), 每个处理 3 次重复, 除 CK 外, 每个处理的施氮水平为 3 000 mg/kg. 采用 stanford 等^[20]建立的“好气培养-间歇淋洗法”, 在底部有小孔(直径 0.5 cm)的特制玻璃管底部放入 160 目尼龙滤网封住底口, 并在其上垫 3 cm 厚石英砂, 称取过 2 mm 筛的风干土样 20.0 g, 肥料 0.4~0.6 g(每 1 g 土加 3 mg 氮, 共 60 mg 氮)和石英砂 20 g, 加少量 0.01 mol/L 的 CaCl_2 溶液, 混匀, 使其呈松散状态并装入培养管, 上面覆盖石英砂厚 2 cm, 以防止加水时扰乱土层. 用有小孔的聚乙烯薄膜封闭玻璃管上口, 放入 35℃ 的恒温培养箱中连续培养. 从培养之日起在第 1, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56 和 70 d, 加入 100 mL 0.01 mol/L 的 CaCl_2 溶液淋洗, 并测定淋洗液中的铵态氮和硝态氮含量.

1.2.2 氮挥发特性研究

共设 7 个处理, 同 1.2.1, 每个处理 3 次重复, 除 CK 外, 每个处理的施氮水平均为 500 mg/kg. 在每个塑料桶中加入过 2 mm 筛的风干土样 500 g 土壤, 并按照 1 kg 土壤加入 500 mg 氮的标准加入肥料. 将肥料与土壤混合均匀后加入 80 mL 纯水, 使土壤含水量达到田间持水量的 80%. 本试验采用王朝辉等^[21]建立的“通气法”氮挥发吸收装置, 在下层海绵中加入 15 mL 磷酸甘油溶液使海绵润湿, 将海绵放入装置

内部距土壤 5 cm 处; 在上层海绵中加入 15 mL 磷酸甘油溶液使海绵润湿, 将海绵放于桶顶部, 与桶顶相平. 将装置放于恒温培养箱中培养, 温度设置为 25℃. 试验前 10 d 每天取样 1 次, 11~20 d 每 2 d 取样 1 次, 21~29 d 每 3 d 取样 1 次, 30~50 d 每 7 d 取样 1 次, 之后每 15 d 取样 1 次, 第 80 d 截止.

1.2.3 盆栽试验

盆栽试验于 2018 年 10 月 25 日至 2019 年 2 月 14 日在西南大学 1 号玻璃温室进行, 共设 6 个处理, 分别为不施肥(CK)、普通复合肥(OCF)、商品缓释肥(MSRF)、自制专用肥(BCF)、自制缓释肥(BSRF)和茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF). 每盆定植 3 株, 每个处理重复 3 次, 随机排列. 采用不漏底的塑料盆(直径 30 cm, 高 25 cm), 每盆装 5 kg 研磨过 2 mm 筛的土. 除 CK 外, 其余 5 个处理按照每 1 kg 土壤施入氮(N)198 mg, 五氧化二磷(P₂O₅)110 mg 和氧化钾(K₂O)165 mg. 采用分析纯的尿素、过磷酸钙和硫酸钾平衡各处理的养分含量. 普通复合肥(OCF)和自制专用肥(BCF)分 3 次施肥, 即移栽前施基肥、移栽 30 d 后第 1 次追肥和移栽 60 d 后第 2 次追肥. 50% 氮肥作为基肥施入, 剩余 50% 氮肥分两次等量进行追肥, 各处理补充的磷肥和钾肥作为基肥一次性施入. 商品缓释肥(MSRF)、自制缓释肥(BSRF)和茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)采用基肥一次性施入. 种植期间, 采用质量差法调节土壤水分, 使土壤含水量达到田间持水量的 60%.

1.3 测定方法及计算方式

土壤基本理化性状采用常规方法测定^[22], 普通沸石和纳米沸石粒径采用 SEM 扫描电镜(Flex-SEM1000, Hitachi)检测, 硝态氮采用紫外分光光度法测定, 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定^[22].

氨挥发速率(A_{vr})为单位时间内单位土壤上的氨挥发量, 用 mg/(kg·d) 表示; 氨挥发总量(A_{va})为单位土壤中氨挥发总量的毫克数, 用 mg/kg 表示^[20]. 计算公式为

$$A_{vr} = \frac{K}{D}$$

$$A_{va} = \sum_1^{23} K$$

$$D_{\text{总氮}} = D_{\text{铵态氮}} + D_{\text{硝态氮}}$$

$$DR_{\text{总氮}} = D_{\text{总氮}} / 3\ 000 \times 100$$

$$D'_{\text{总氮}} = D'_{\text{铵态氮}} + D'_{\text{硝态氮}}$$

$$DR'_{\text{总氮}} = D'_{\text{总氮}} / 3\ 000 \times 100$$

式中, K 为每次测得的氨量(mg/kg), D 为每次连续捕获的时间(d); $D_{\text{总氮}}$ 为总氮累积溶出量(mg), $D_{\text{铵态氮}}$ 为铵态氮累积溶出量(mg), $D_{\text{硝态氮}}$ 为硝态氮累积溶出量(mg); $DR_{\text{总氮}}$ 为总氮累积溶出率(%); $D'_{\text{总氮}}$ 为瞬时总氮溶出量(mg), $D'_{\text{铵态氮}}$ 为瞬时铵态氮溶出量(mg), $D'_{\text{硝态氮}}$ 为瞬时硝态氮溶出量(mg); $DR'_{\text{总氮}}$ 为总氮瞬时溶出率(%). 为了降低土壤养分溶出对试验造成影响, 各施肥处理值均为原始值减去不施肥处理(CK)值后所得数据^[23].

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2013 等对数据进行分析 and 处理.

2 结果与分析

2.1 铵态氮累积溶出量

各处理铵态氮累积溶出量如图 1, 所有处理溶出增长速度均表现为前期大于后期. 第 70 d 时 NBSRF 的铵态氮溶出总量(2 014.04 mg/kg)低于 MZF, OCF 和 MSRF, 降低了 216.48~813.58 mg/kg, 降幅为 11.49%~28.77%, 但高于 BCF 和 BSRF, 分别增加了 84.18 和 89.34 mg/kg, 增幅为 4.36% 和 4.64%.

NBSRF 前期的铵态氮累积溶出量低于 BCF 和 BSRF, 但后期高于 BCF 和 BSRF.

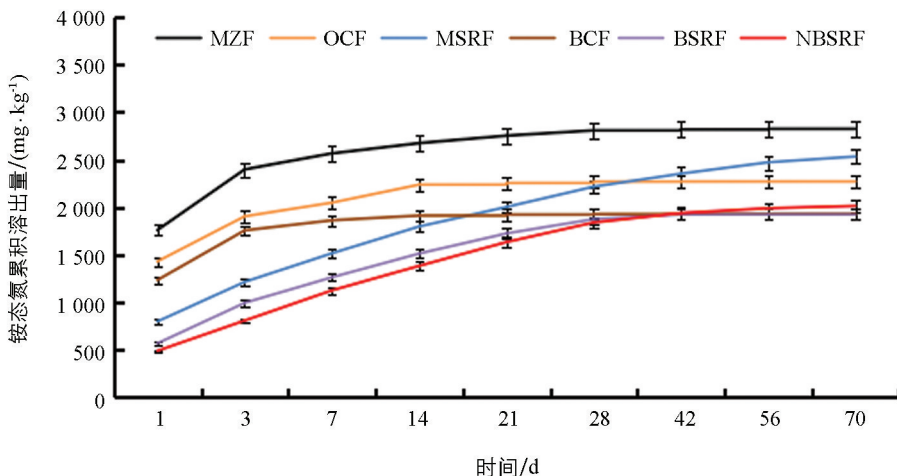


图 1 各处理铵态氮累积溶出量

2.2 硝态氮累积溶出量

图 2 中, 各处理间硝态氮累积溶出量(第 70 d)由大到小依次为 BSRF, BCF, NBSRF, OCF, MSRF, MZF. NBSRF 的硝态氮累积溶出量高于 MZF, MSRF 和 OCF, 分别增加了 668.84, 587.93 和 5.51 mg/kg, 但低于 BCF 和 BSRF, 分别降低了 18.87 和 80.07 mg/kg.

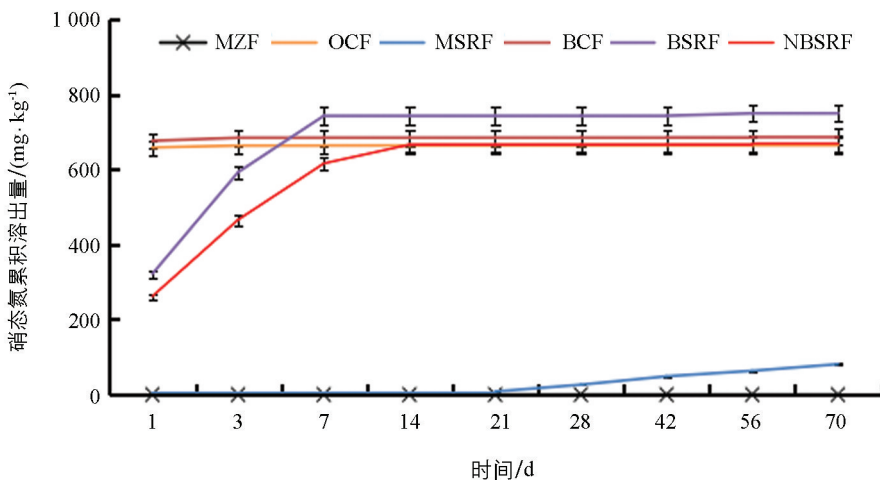


图 2 各处理硝态氮累积溶出量

2.3 总氮累积溶出量

图 3 中, 各处理的总氮累积溶出量变化趋势相同, 均表现为前期增长快, 后期增长慢. 各处理间的总氮累积溶出量(第 21 d)由大到小依次为 OCF, MZF, BCF, BSRF, NBSRF, MSRF. 非缓释肥(MZF, OCF 和 BCF)的总氮溶出主要在培养前 14 d, 缓释肥(MSRF, BSRF 和 NBSRF)总氮溶出速率较慢, 氮素溶出时间延长.

2.4 总氮累积溶出率

总氮累积溶出率能动态反应氮素在土壤中的溶出情况. 图 4 中, 各处理间总氮累积溶出率(第 21 d)由大到小依次为 OCF, MZF, BCF, BSRF, NBSRF, MSRF. 培养过程中 NBSRF 的溶出率比 MZF 降低了 4.82%~37.49%, 比 OCF 降低了 8.53%~44.56%, 比 BCF 降低了 2.18%~38.89%, 比 BSRF 降低了 0.31%~10.42%. 第 70 d, NBSRF 的总氮累积溶出率为 89.74%.

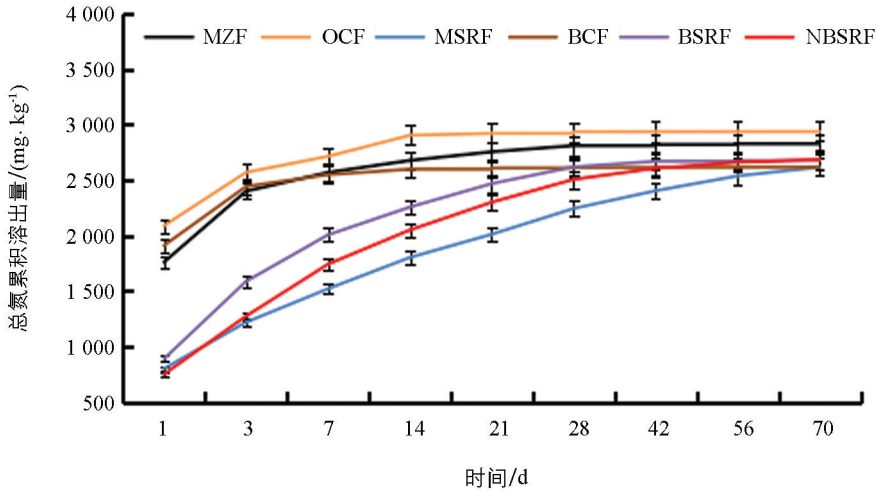


图 3 各处理总氮累积溶出量

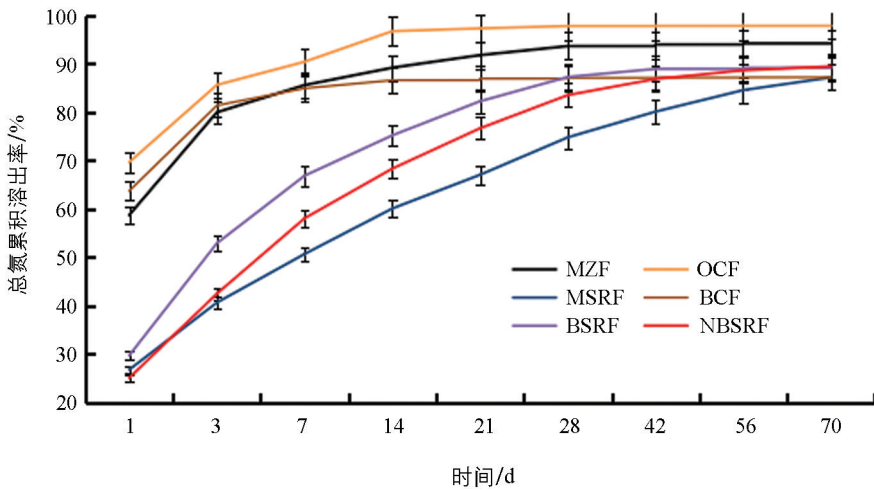


图 4 各处理总氮累积溶出率

2.5 总氮瞬时溶出率

总氮瞬时溶出率是每次淋溶中溶出总氮与施氮总量的百分率,能较好地反应氮肥每次的溶出情况,是对总氮累积溶出量增速的反应.图 5 中,NBSRF 在培养前期总氮瞬时溶出率显著低于 MZF,OCF 和 BCF,但培养后期高于 MZF,OCF 和 BCF.在 1~3 d 内 NBSRF 总氮瞬时溶出率比 BSRF 低 4.64%~5.79%;从第 7 d 开始 NBSRF 总氮瞬时溶出率高于 BSRF,比 BSRF 增加了 0.83%~1.93%.结果表明与普通肥料相比,NBSRF 具有前期养分溶出慢、溶出时间长的特点,NBSRF 的缓释效果优于 BSRF.

2.6 氨挥发速率

图 6 中,各处理的氨挥发速率在培养开始后快速增加,在培养的第 5~10 d 达到峰值,随后逐渐降低,在 25 d 以后稳定在一个较低水平.培养前期 NBSRF 的氨挥发速率低于 MZF,OCF,BCF 和 BSRF,但高于 MSRF.NBSRF 的氨挥发速率峰值为 5.02mg/(kg·d),比 MZF,OCF,BCF 和 BSRF 降低了 48.77%,29.79%,20.99%和 8.11%.

2.7 氨挥发总量

各处理的氨挥发总量随培养时间的延长而增加,在培养的前 20 d 增长迅速,20 d 以后增长缓慢(图 7).各施肥处理中,NBSRF 的氨挥发总量低于 MZF,OCF,BCF 和 BSRF,分别降低了 41.20%,26.59%,23.57%和 9.78%.

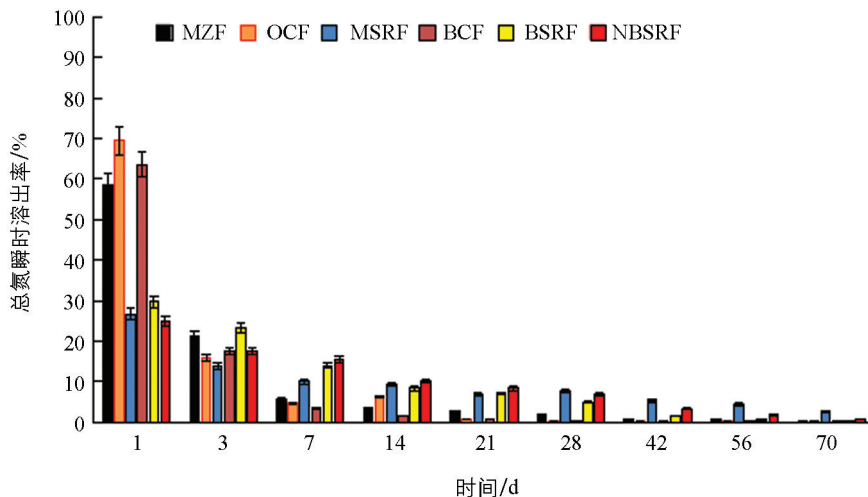


图 5 各处理总氮瞬时溶出率

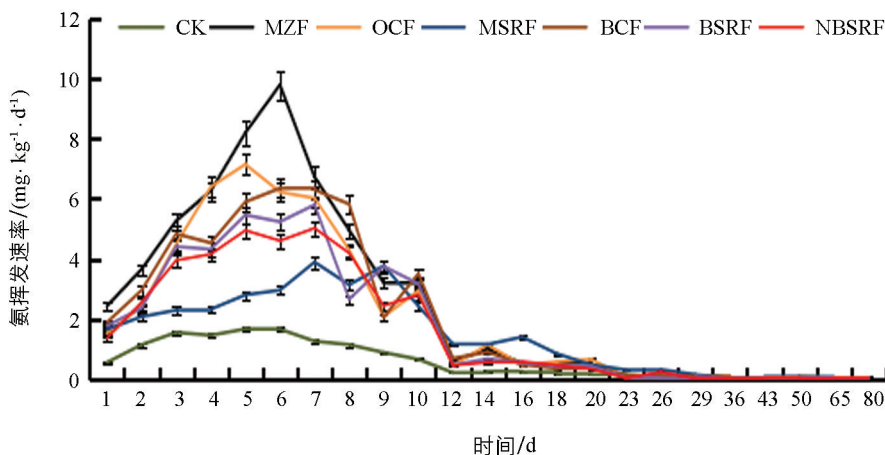


图 6 各处理的氮挥发速率

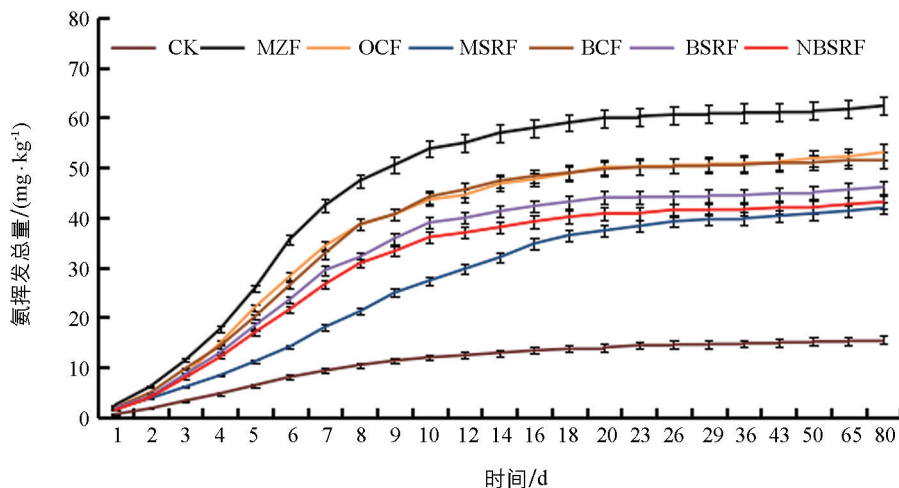


图 7 各处理氮挥发总量

2.8 茎瘤芥生物量

表 1 中, 永安小叶各处理间的生物总量由大到小依次为 BSRF, BCF, NBSRF, MSRF, OCF, CK. 永安小叶各处理间的茎(可食部位)生物量由大到小依次为 BSRF, BCF, NBSRF, OCF, MSRF, CK. NBSRF 的茎生物量分别比 OCF 和 MSRF 增加了 3.80% 和 7.26%.

涪杂 2 号各处理间的生物总量由大到小依次为 BSRF, BCF, NBSRF, OCF, MSRF, CK. 涪杂 2 号各

处理间的茎生物量(可食部位)由大到小依次为 BSRF, BCF, NBSRF, OCF, MSRF, CK. NBSRF 的茎生物量分别比 OCF 和 MSRF 增加了 2.70% 和 9.54%.

表 1 不同处理的茎瘤芥生物量

品种	处理	根/		茎/		叶/		总量/	
		(g·盆 ⁻¹)		(g·盆 ⁻¹)		(g·盆 ⁻¹)		(g·盆 ⁻¹)	
永安小叶	CK	14.02±0.87d		72.42±11.91c		51.07±6.43d		137.50±17.74c	
	OCF	23.62±1.73c		277.83±20.68b		257.56±6.41bc		559.01±14.28b	
	MSRF	26.69±1.61bc		268.87±15.24b		272.00±6.93a		567.56±14.73b	
	BCF	29.88±3.11ab		304.84±21.90ab		278.7±6.08a		613.45±23.38a	
	BSRF	29.99±2.99ab		327.26±21.25a		267.21±7.60ab		624.46±44.58a	
	NBSRF	33.53±4.73a		288.39±18.49b		252.17±12.04c		574.09±16.22b	
涪杂 2 号	CK	17.55±2.64b		70.51±3.29d		57.93±0.98b		145.97±4.72d	
	OCF	28.23±1.48a		290.39±12.91b		229.93±16.97a		548.54±24.70bc	
	MSRF	25.33±2.17a		272.27±13.38c		228.32±9.33a		525.91±14.62c	
	BCF	27.01±2.45a		302.79±11.96b		240.16±12.76a		570.21±16.46ab	
	BSRF	26.62±2.63a		331.35±16.63a		237.14±20.16a		595.10±21.78a	
	NBSRF	20.32±2.59a		298.24±5.75b		244.43±4.96a		562.98±6.59b	

注:小写字母不同表示相同品种同一指标中各处理差异有统计学意义, $p < 0.05$.

2.9 茎瘤芥各器官氮、磷、钾质量分数

表 2 中,茎瘤芥各器官氮质量分数中叶与茎大致相同,均大于根;磷质量分数由大到小依次为茎、根、叶;钾质量分数由大到小依次为茎、叶、根.永安小叶 NBSRF 的叶全氮质量分数最高,比其他施肥处理增加了 6.43%~13.28%.永安小叶 NBSRF 的茎全氮质量分数高于 OCF, MSRF 和 BCF,增幅分别为 6.31%, 13.35% 和 9.59%,但低于 BSRF,降幅为 1.35%.永安小叶 NBSRF 的根全氮质量分数高于 BCF 和 BSRF,分别增加了 23.91% 和 15.35%,但低于 OCF 和 MSRF,分别降低了 13.09% 和 5.13%.

涪杂 2 号根和叶的全氮质量分数均以 NBSRF 最高,比其他施肥处理增加 10.60%~34.24% 和 2.88%~20.72%.涪杂 2 号 NBSRF 茎的全氮质量分数高于 OCF, MSRF 和 BSRF,增幅分别为 12.00%, 3.85% 和 8.10%,但低于 BCF,比 BCF 降低 1.43%.

表 2 不同处理的茎瘤芥氮、磷、钾质量分数

/%

品种	处理	全氮			全磷			全钾		
		根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
永安小叶	CK	5.54±0.16e	5.80±0.14d	14.27±0.44d	3.61±0.14c	2.76±0.13c	2.92±0.12c	18.20±0.94bc	19.73±0.39b	25.57±0.92d
	OCF	7.87±0.12a	22.68±0.85b	22.68±0.31bc	5.04±0.13a	6.60±0.24a	4.51±0.33a	24.19±0.56a	44.46±1.28a	28.00±0.37bc
	MSRF	7.21±0.36b	21.27±1.08c	23.49±0.55b	4.49±0.18b	5.98±0.28b	3.72±0.19b	24.09±0.65a	44.68±1.13a	28.78±0.7b
	BCF	5.52±0.08e	22.00±0.39bc	22.07±0.48c	3.35±0.19c	5.79±0.10b	3.80±0.01b	18.79±0.59b	44.72±0.35a	31.17±0.45a
	BSRF	5.93±0.24d	24.44±0.67a	23.48±0.63b	3.55±0.17c	5.99±0.09b	3.53±0.22b	17.17±0.22c	44.04±1.15a	27.33±0.65c
	NBSRF	6.84±0.04c	24.11±0.70a	25.00±0.48a	3.42±0.15c	5.86±0.17b	3.50±0.06b	18.65±0.17b	45.84±1.78a	26.79±0.88cd
涪杂 2 号	CK	6.58±0.15c	7.49±0.10e	13.74±0.29d	4.51±0.23c	3.26±0.09d	2.80±0.03c	20.91±0.50b	24.31±1.01f	28.11±0.14d
	OCF	6.56±0.33c	22.17±0.79d	21.00±0.24bc	6.43±0.12a	6.26±0.37b	4.03±0.25a	19.80±0.28bc	41.30±0.52e	27.64±0.30d
	MSRF	7.55±0.54b	23.91±0.37bc	20.75±0.14c	5.30±0.19b	7.15±0.12a	3.70±0.14b	24.12±0.78a	49.47±0.86a	34.18±0.42a
	BCF	6.37±0.25c	25.19±0.99a	21.79±0.31b	5.37±0.02b	6.50±0.10b	3.79±0.16ab	18.97±1.59cd	48.10±0.11b	33.82±0.61a
	BSRF	6.22±0.28c	22.97±0.52cd	24.35±0.94a	5.64±0.39b	5.76±0.17c	3.91±0.11ab	17.65±0.52d	45.62±1.17c	32.54±0.80b
	NBSRF	8.35±0.39a	24.83±0.73ab	25.05±0.58a	4.37±0.23c	5.82±0.25c	3.69±0.13b	19.66±1.09bc	43.24±0.11e	29.81±0.55c

注:小写字母不同表示相同品种同一指标中各处理差异有统计学意义, $p < 0.05$.

2.10 茎瘤芥氮、磷、钾吸收量

表 3 显示, 永安小叶各处理中 NBSRF 的氮吸收量小于 BSRF, 但高于 OCF, MSRF 和 BCF, 分别增加了 11.60%, 12.41% 和 9.21%。永安小叶 NBSRF 的钾吸收量高于 OCF 和 MSRF, 分别增加了 2.91% 和 3.04%。

涪杂 2 号以 BSRF 处理对氮的吸收量最大, 比其他施肥处理增加 2.11%~17.30%。涪杂 2 号 NBSRF 的氮吸收量高于 OCF, MSRF 和 BCF, 分别增加了 5.39%, 14.87% 和 3.85%。

2.11 茎瘤芥氮、磷、钾表观利用率

表 3 显示, 永安小叶对养分的吸收和表观利用率大于涪杂 2 号, 说明永安小叶对养分的吸收能力大于涪杂 2 号。在永安小叶和涪杂 2 号中, 氮肥表观利用率由大到小依次为 BSRF, NBSRF, BCF, OCF, MSRF。在永安小叶中, 与 OCF 相比, NBSRF 的氮表观利用率提高了 10.05%; 与 BCF 相比, NBSRF 的氮表观利用率提高了 8.16%。在涪杂 2 号中, 与 OCF 相比, NBSRF 的氮表观利用率提高了 4.41%; 与 BCF 相比, NBSRF 的氮表观利用率提高了 3.20%。在涪杂 2 号中, 磷的表观利用率由大到小依次为 OCF, BSRF, BCF, MSRF, NBSRF。本研究中, 大部分处理的 K_2O 利用率大于 100%, 这可能是因为茎瘤芥属于喜钾作物, 对钾肥的需求量较大, 除吸收了肥料提供的钾外还可能吸收了土壤中的钾, 因此, 在未来的茎瘤芥配方肥研究中, 需根据耕地养分状况和茎瘤芥钾营养需求, 提高茎瘤芥专用肥中钾的质量分数, 以满足茎瘤芥的养分需求, 提高土壤肥力水平。

表 3 不同处理的茎瘤芥对氮、磷、钾吸收量和表观利用率

品种	处理	N		P_2O_5		K_2O	
		吸收量/ ($mg \cdot 盆^{-1}$)	表观利用率/ %	吸收量/ ($mg \cdot 盆^{-1}$)	表观利用率/ %	吸收量/ ($mg \cdot 盆^{-1}$)	表观利用率/ %
永安小叶	CK	150.54±18.21d	—	52.45±6.04c	—	379.43±21.12c	—
	OCF	857.51±18.32c	71.44	219.75±5.87a	30.42	1 395.60±41.41b	123.17
	MSRF	851.31±19.54c	70.82	189.48±4.70b	24.91	1 393.79±35.93b	122.95
	BCF	876.23±30.29c	73.33	199.39±8.23b	26.72	1 539.25±31.15a	140.58
	BSRF	1 023.64±11.55a	88.22	218.65±18.33a	30.22	1 588.48±67.52a	146.55
	NBSRF	956.96±28.98b	81.49	190.42±3.19b	25.09	1 436.23±6.24b	128.10
涪杂 2 号	CK	186.23±5.73d	—	65.17±2.75e	—	491.52±16.64e	—
	OCF	809.55±18.44b	62.96	219.68±9.23a	28.09	1 349.81±30.27c	104.04
	MSRF	742.72±10.04c	56.21	192.31±5.61c	23.12	1 423.20±39.00b	112.93
	BCF	821.54±21.50ab	64.17	198.14±12.84bc	24.18	1 464.22±43.73b	117.90
	BSRF	871.20±15.79a	69.19	209.30±17.11ab	26.21	1 558.44±52.07a	129.32
	NBSRF	853.19±38.08ab	67.37	171.89±7.56d	19.40	1 274.95±54.37d	94.96

注: 小写字母不同表示相同品种同一指标中各处理差异有统计学意义, $p < 0.05$ 。

3 讨论

纳米材料应用到肥料中能较好地实现肥料中氮素缓释的效果^[16]。孙德权等^[12]将尿素以溶液的方式装载到纳米二氧化硅的孔道中, 利用 1-癸硫醇对尿素进行堵塞, 能实现对尿素的“封控”效果。本研究利用纳米沸石结合脲酶/硝化抑制剂研制出茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF), NBSRF 的总氮累积溶出率比 MZF 降低了 4.82%~37.69%, 比 OCF 降低了 8.53%~44.56%, NBSRF 表现出较好的缓释效果, 但其缓释效果低于商品缓释肥(MSRF)。

氮挥发损失是氮肥损失的重要途径, 约占到农田施氮量的 9%~40%, 氮挥发损失不仅会造成肥料利

用率低,资源浪费,也会带来大气污染和水体富营养化等环境问题^[24-25].与普通肥料相比,缓释肥具有降低肥料氨挥发的作用^[23].如 Silva 等^[26]研究发现脲酶抑制剂(nBPT)能降低尿素水解速度,与尿素相比,尿素+nBPT 能降低氨挥发损失的 52%.本研究中,茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)、自制缓释肥(BSRF)和商品缓释肥(MSRF)的氨挥发速率和氨挥发总量均低于茎瘤芥商品专用肥(MZF)、普通复合肥(OCF)和自制专用肥(BCF),表明与普通肥料相比,缓释肥能降低肥料的氨挥发速率和氨挥发总量.氨挥发峰值主要在施肥后 5~10 d 出现,缓释肥的氨挥发峰值低于普通肥料,缓释肥的氨挥发峰值比普通肥料延迟 1~3 d,缓释肥的氨挥发总量均低于普通肥料.

施肥是提高茎瘤芥产量和品质的重要方式之一^[27].缓释肥作为一种新型肥料,具有养分含量高、养分释放慢和养分利用率高等特点,在提高作物产量和改善品质方面比普通复合肥更具优势^[28-29].王菲等^[6]在茎瘤芥上的研究发现,缓释复合肥与茎瘤芥专用肥相比,在相同养分投入的情况下能显著增加茎瘤芥的产量,改善品质,同时还能减少劳动强度.在永安小叶和涪杂 2 号中,NBSRF 的茎生物量高于 OCF 和 MSRF,增幅分别为 2.70%~3.80%和 7.26%~9.54%.茎生物量涪杂 2 号大于永安小叶.冯爱青等^[30]在水稻上的研究发现,在等氮养分的投入下,缓释尿素的氮肥利用率比普通尿素的氮肥利用率提高了 40.42%.韩桂琪^[31]在茄子上的研究发现,缓释肥的氮肥利用率和钾肥利用率比普通复合肥提高了 44.90%~52.83%和 47.99%~63.27%.本研究中,茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)的氮肥表观利用率均高于普通复合肥(OCF)和自制专用肥(BCF),表明缓释肥能增加茎瘤芥对氮肥的吸收,有利于提高氮肥的表观利用率.

4 结论

茎瘤芥专用纳米缓释肥(NBSRF)具有较好的缓释性能,缓释期大约为 70 d,总氮累积溶出率为 89.74%.相同溶出时间,NBSRF 的总氮累积溶出率低于商品专用肥(MZF),普通复合肥(OCF).与 MZF,OCF,BCF 和 BSRF 相比,NBSRF 的氨挥发峰值延迟 1~3 d,氨挥发量降低 9.78%~41.20%.NBSRF 新型肥料在一定程度上提高了茎瘤芥的产量(茎生物量)和氮肥表观利用率,NBSRF 处理下的茎生物量涪杂 2 号大于永安小叶.

参考文献:

- [1] 杨丽丽. 涪陵地区水稻-榨菜轮作的养分管理研究 [D]. 重庆:西南大学,2020.
- [2] 姚磊. 不同养分管理条件下榨菜-玉米轮作氮素去向研究 [D]. 重庆:西南大学,2012.
- [3] 李忠意. 重庆涪陵榨菜种植区土壤酸化特征及其改良研究 [D]. 重庆:西南大学,2012.
- [4] 黄芸,徐莉,肖崇刚,等. 根肿菌侵染对茎瘤芥(榨菜)根系玉米素和吲哚乙酸含量的影响 [J]. 中国蔬菜,2014(2): 41-44.
- [5] 闫玉芳,赵如娜,陈文龙,等. 茎瘤芥 3 种蚜虫的取食特性及适应性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2021, 43(8): 42-49.
- [6] 王菲,王正银,赵欢,等. 缓释复合肥料对茎瘤芥产量、品质和养分含量的影响 [J]. 中国蔬菜,2012(20): 68-72.
- [7] 吴振宇,周子军,杨阳,等. 新型缓释尿素的缓释特性及其在土壤中转化研究 [J]. 中国农学通报,2018, 34(6): 84-90.
- [8] 栗印环,张秀兰,秦雪,等. 天然沸石对肥料的控释作用探究 [J]. 非金属矿,2013, 36(4): 53-55.
- [9] 李旭霞,宋海星,廖琼,等. 纳米膨润土包膜氮肥对晚稻产量与氮素利用率的影响 [J]. 中国农学通报,2018, 34(11): 81-85.
- [10] CHEN J, FAN X L, ZHANG L D, et al. Research Progress in Lignin-based Slow/Controlled Release Fertilizer [J]. Chem Sus Chem, 2020, 13(17): 4356-4366.
- [11] 蔡璘,丰慧,贾环宇,等. 纳米氧化镁促进番茄植株生长的机理 [J]. 植物营养与肥料学报,2020, 26(7): 1318-1327.

- [12] 孙德权, 陆新华, 胡玉林, 等. 纳米硅材料对植物生长发育影响的研究进展 [J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2300-2311.
- [13] 张夫道, 赵秉强, 张骏, 等. 纳米肥料研究进展与前景 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 254-255.
- [14] 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.
- [15] 陈序根. 白菜专用包膜缓释肥氮素释放特性及对白菜产量和品质的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [16] 白杨. 纳米 SiO₂-聚乙烯醇- γ -聚谷氨酸复合物包膜肥料研制及其养分缓释机理 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [17] 贾传秀. 聚氨酯基纳米复合材料包膜肥料的研制与性能研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [18] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(10): 4030-4043.
- [19] 朱婧, 白玉超, 王宗抗, 等. 稻壳炭和沸石对赤红壤和潮土磷有效性的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(29): 93-99.
- [20] STANFORD G, SMITH S J. Nitrogen Mineralization Potentials of Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3): 465-472.
- [21] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 肖强. 有机-无机复合材料胶结包膜型缓/控释肥料的研制及评价 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [24] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氮挥发排放的控制效果 [J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5326-5332.
- [25] 宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 等. 脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征 [J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 585-597.
- [26] SILVA A G B, SEQUEIRA C H, SERMARINI R A, et al. Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: a Meta-analysis [J]. Agronomy Journal, 2017, 109(1): 1-13.
- [27] 吴玥, 寇智瑞, 陈新平, 等. 氮肥供应对辣椒营养品质的影响及评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 87-94.
- [28] 刘芳, 邹强, 王正银, 等. 缓释复合肥对蔬菜产量和品质的效应研究 [J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(6): 73-75.
- [29] 陈语, 翟泰雅, 王芳芳, 等. 氮肥对黄壤温室气体排放和玉米产量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(8): 37-47.
- [30] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 177-184.
- [31] 韩桂琪. 蔬菜专用缓释肥对辣椒、茄子产量与品质的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.