

# 脲酶—硝化抑制剂缓释肥对不同土壤氮素释放特性及 黄瓜 NPK 吸收利用的影响

赵婉伊, 徐卫红, 王崇力, 王卫中, 陈永勤, 迟荻琳, 陈序根, 秦余丽, 王正银

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 为了提高黄瓜氮素利用率, 减少氮肥对环境污染, 采用恒温培养和土培试验研究了专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥(CSRF1 和 CSRF2)在酸、碱、中性土壤中的氮素释放特性以及对黄瓜生长、NPK 吸收利用的影响, 其中缓释肥中包含抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(nBPT)、氢醌(HQ)、双氰胺(DCD)。结果表明: 在酸、碱、中性 3 种不同土壤中, 氮素释放累积量均表现为普通复合肥(OCF) > 商品缓释肥(MSRF) > 自制专用肥(CCF) > 自制专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥 1(CSRF1) > 自制专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥 2(CSRF2); 不同施肥处理对于 3 种土壤类型影响下的氮素累积释放量顺序为碱性土最大, 中性土次之, 酸性土最小。铵态氮、硝态氮的累积量大小顺序也为碱性土最大, 中性土次之, 酸性土最小。不同形态氮在 3 种土壤中的累积释放量动态以应用一级动力学方程拟合最好( $r=0.952^{**} \sim 0.993^{**}$ )。通过一级动力学方程, 反映了 3 种形态氮素的最大释放量  $N_0$  值大小顺序: 总 N 最大,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  次之,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  最小, 此结果与土壤中不同形态的氮素累积释放特性变化规律相一致。2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥(CSRF1 和 CSRF2)显著提高了黄瓜产量(果实干物质量), 较 OCF、MSRF 和 CCF 处理分别增加了 59.1%, 30.3%, 33.8%(CSRF1)和 46.2%, 19.7%, 22.9%(CSRF2)。与普通复合肥相比, 2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥处理的 NPK 相对养分利用效率增加了 18.52%~24.20%(N), 19.27%~20.02%(P), 28.54%~35.69%(K)。相较于普通复合肥, 黄瓜专用脲酶—硝化抑制剂缓释肥的施用能够延缓肥料中的氮素释放, 提高黄瓜 NPK 养分利用率和黄瓜产量。

**关键词:** 专用缓释肥料; 脲酶硝化双抑制剂; 氮素释放特性; NPK 吸收利用; 黄瓜

中图分类号: S145.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0250-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.042

## Effects of Slow-release Fertilizer Containing Urease-Nitrification Inhibitor on Nitrogen Release Characteristics in Different Soils and Uptake and Utilization of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium by Cucumber

ZHAO Wanyi, XU Weihong, WANG Chongli, WANG Weizhong, CHEN Yongqin,

CHI Sunlin, CHEN Xugen, QIN Yuli, WANG Zhengyin

(College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** In order to improve nutrient utilization efficiency by cucumber and reduce the environmental pollution, special slow-release fertilizers containing urease inhibitor (NBPT), hydroquinone (HQ) and nitrification inhibitor (DCD) were produced according to the nutrient requirements of cucumber. Nitrogen release characteristics of two special slow-release fertilizers were studied by using the soil incubating method. Pot experiments were conducted to study the effects of slow-release fertilizers on yield, uptake and utilization rate of fertilizer and NPK by cucumber. The results showed that in three different soils, nitrogen release accumulation was in the order of ordinary compound fertilizer (OCF) > commercial slow-release fertilizer (MSRF) > cucumber special compound fertilizer NO. 1 (CCF) > cucumber special slow-release fertilizer NO. 2 (CSR1) > cucumber special slow-release fertilizer (CSR2), and nitrogen release accumulation in special slow release fertilizers (CSR1 and CSR2) were less than that of other fertilizer treatments. The amount of accumulated nitrogen release of different fertilizer treatments in three different soil types showed the order of

收稿日期: 2016-11-17

资助项目: 现代农业大宗蔬菜产业技术体系建设专项(Nycytx-25); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10)

第一作者: 赵婉伊(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物营养与环境生态研究。E-mail: 478656727kina@163.com

通信作者: 徐卫红(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事植物营养与环境生态研究。E-mail: xuwei\_hong@163.com

alkaline soil > neutral soil > acid soil. Nitrogen accumulation amount of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was more than that of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , possibly due to the nitrification inhibitor (DCD) could not only inhibit soil nitrification and denitrification processes, but could also inhibit soil denitrification process. The nitrification process was inhibited by nitrification inhibitors, and the nitrogen fertilizer would remain in the soil for a long time in the form of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ . Nitrogen accumulation amount of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  was also in the order of alkaline soil > neutral soil > acid soil. The dynamic release of different forms of nitrogen in three soils was fitted with a dynamic equation of the first order kinetic equation ( $r = 0.952^{**} - 0.993^{**}$ ). Using the first order kinetic equation, the  $N_0$  value of the maximum release rate of different forms of nitrogen was in the order of total N >  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  >  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , which was consistent with the changes of the accumulation and release characteristics of different forms of nitrogen in the soil. The dynamic characteristics of nitrogen release by the equation were suitable for the prediction of the release properties and release characteristics of nitrogen in the soil. Two kinds of special slow release fertilizers (CSRF1 and CSRF2) significantly increased the yield of cucumber by 59.1%, 30.3%, 33.8% (CSRF1), and 46.2%, 19.7%, 22.9% (CSRF2), compared with treatments of OCF, MSRF and CCF, respectively. Compared with common compound fertilizer, nutrient relative utilization efficiency of NPK in two kinds of special slow release fertilizer treatments was increased by 18.52%–24.20% (N), 19.27%–20.02% (P), and 28.54%–35.69% (K), respectively. Compared with traditional fertilizer, the use of two special slow-release fertilizers could effectively delay the N release in the soil, and increase the uptake of N, P, and K by cucumber plants and cucumber yield.

**Keywords:** special slow-release fertilizer; urease inhibitor and nitrification inhibitor; nitrogen release characteristics; uptake and utilization of NPK; cucumber.

在农业生产中,过量施用化肥现象很常见<sup>[1-2]</sup>。然而过量化肥施用往往会导致土壤酸化,从而影响农业生产成本和作物质量,更为严重则污染环境<sup>[1-3]</sup>。在国外,发达国家的氮、磷、钾肥利用率远远高于我国,我国 N、P、K 肥利用率平均仅在 30% 左右<sup>[4]</sup>,因此,近 20 a 来,植物营养研究者们一直在研究既能提高作物产量和肥料利用率,又能减少对环境造成污染的新型肥料。缓控释肥料正是此类新型、环境友好型肥料<sup>[5-7]</sup>。为了验证缓控释肥对作物的增产效应,李锋等<sup>[8]</sup>通过缓控释肥、晚稻专用配方肥以及单质肥料在田间试验的施用对比研究发现,缓控释肥相比其他 2 种肥料更能改善晚稻经济性状,增加其产量。陈静芬等<sup>[9]</sup>采用大田试验方法对缓控释肥、配方肥和当地习惯施肥进行对比研究发现,相比配方肥和当地施肥,缓控释肥提高了玉米产量与肥料利用率。目前,关于缓控释肥料的研究大多集中在效应的验证,而对于缓控释肥料释放机理与作物吸收之间的相互关系研究较少<sup>[1]</sup>。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)具有生长快、产量高、结果多、需肥量大,但由于根系耐肥力弱、分期采收等特点,需不断增补肥料。黄瓜生产过程中,为了增产而过量施肥的现象频频发生,由于 N、P、K 三大元素投入比例不平衡,土壤中的中微量元素的供应不足,使得土壤营养不均,蔬菜的品质和产量下降<sup>[1]</sup>。

本文采用盆栽试验研究了专用脲酶硝化双抑制

剂缓释肥对黄瓜产量以及养分 N、P、K 吸收利用的影响,并采用土壤恒温培养模拟试验研究了专用缓释肥的氮素累积释放特性。研究中采用的自制黄瓜专用缓释肥是根据黄瓜生长需肥特性所研发,包含 N、P、K 大量元素和少量 Ca、Mg、B 等中微量元素及脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(nBPT)、氢醌(HQ),硝化抑制剂双氰胺(DCD)。通过研究专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥对黄瓜产量、NPK 养分吸收利用的影响和其在不同土壤中氮素释放特性,以期为农业生产中降低化学施用量、提高作物氮肥利用率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试作物为黄瓜(*Cucumis sativus* L.),品种为“燕白”,幼苗由重庆农科院蔬菜花卉研究所提供。恒温培养试验供试酸性土取自重庆璧山七塘镇蔬菜基地,供试中性土取自重庆九龙坡区蔬菜基地,供试碱性土取自重庆铜梁区蔬菜基地,3 种类型供试土壤取土深度均为 0—20 cm,基本理化性质见表 1。

盆栽试验供试土壤为酸性紫色土,采自重庆市西南大学紫色土基地,以多点取样法采 0—20 cm 深度土壤,自然风干后过 2 mm 筛。有机质含量为 15.2 g/kg,全氮含量为 8.8 g/kg,碱解氮含量为 113.8 mg/kg,有效磷含量为 9.3 mg/kg,有效钾含量为 158.3 mg/kg,pH 为 5.9。供试肥料包括普通复合肥

(OCF)、商品缓释肥 (MSRF)、自制黄瓜专用肥 (CCF)、2 种自制黄瓜专用缓释肥 (CSRF1 和 CSRF2),其中自制黄瓜专用肥和自制黄瓜专用缓释肥包含 N、P、K 大量元素和少量 Ca、Mg、B 等中微量元素及菌渣等有机质,N:P:K 配比为 12:7:18。

表 1 供试土壤的基本理化性质

| 土壤类型 | pH 值 | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|------|------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 酸性土  | 4.64 | 15.2                          | 0.66                         | 112.3                          | 57                             | 170.3                          |
| 中性土  | 6.66 | 16.54                         | 0.62                         | 102.8                          | 26.18                          | 95.5                           |
| 碱性土  | 7.58 | 16.1                          | 0.57                         | 120.3                          | 32.0                           | 97.2                           |

1.2 试验设计

本试验中的土壤恒温培养试验方法参考 Standford 等<sup>[1]</sup>建立的间歇淋洗法。本试验共设 5 个处理 (CSRF1, CSRF2, CCF, OCF, MSRF),每个处理 3 次重复,随机排列。将 160 目的尼龙滤网放入底部有小孔(直径为 0.5 cm)的特制玻璃管(直径为 3 cm,高 14.5 cm)并封住底部,在尼龙网上铺平 2 cm 厚的石英砂。再分别称取 20 g 石英砂,过 2 mm 筛孔的风干土 20.00 g,加入 N 水平为 500 mg/kg 肥料,采用过磷酸钙和氯化钾平衡各处理之间的磷、钾含量差异。为了更好地浸提不同 N 素形态,将少量 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液与称取的石英砂和处理土样混匀后倒入玻璃管,并覆盖上 3 cm 厚的石英砂。用刺满直径 1 mm 小孔的塑料薄膜封住玻璃管口后放置于 35 ℃ 的恒温培养箱连续培养,分别计时 1,3,7,14,21,28,42 d,时间从培养当日开始计算,用 100 mL 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液冲洗 2~3 次,最后测定淋洗液中全氮含量、硝态氮和铵态氮含量。

盆栽试验于 2014 年 3 月 1 日—7 月 30 日在西南大学资源环境学院温室进行。共设置 5 个处理,分别为 OCF、CCF、MSRF、CSRF1 和 CSRF2。试验中 N 用量为 180 mg/kg,用以对比等 N 量的各处理对黄瓜生长及 NPK 利用率的影响。P 用量为 150 mg/kg,K 用量 120 mg/kg,采用过磷酸钙和氯化钾平衡各处理之间的磷、钾含量差异。CCF 和 OCF 分 3 次施肥,即基肥、开花期追肥、盛果期追肥。基肥为 N 总量的 50%,追肥分别为 N 总量的 30%,20%。CSRF 和 MSRF 做基肥一次性施入。每盆塑料盆(直径 20 cm,高 17 cm)装入过 40 目筛的风干土 5 kg,与基肥混匀。移栽黄瓜幼苗每盆 2 株。培养期间,土壤水分的调节采用称质量法,保持土壤田间持水率的 60%。每个处理设置 3 次重复,随机排列。从第 1 次结果开始记产,移栽 120 d 后收获,在 105 ℃ 下将植株杀青 15 min,在 60 ℃ 下烘干至恒质量。

1.3 测定方法

植株 NPK 含量及土壤基本理化性质采用常规方法

自制黄瓜专用缓释肥中所添加的脲酶为 N—丁基硫代磷酰三胺(nBPT)、氢醌(HQ),硝化抑制剂双氰胺(DCD),其中 CSRF1 包含 nBPT 和 DCD,CSRF2 包含 HQ 和 DCD。OCF 为贵州西洋集团所产的普通复合肥,MSRF 为青岛住商非包膜缓释复合肥。

测定<sup>[10]</sup>。测定恒温培养试验的淋洗液中的全氮含量采用过硫酸钾氧化法,硝态氮含量测定采用紫外分光光度法,铵态氮含量测定采用蒸馏后滴定法<sup>[10]</sup>。表观利用率=(专用肥或缓释肥处理植株养分吸收量—普通化肥处理植株养分吸收量)/施肥量×100%)<sup>[1]</sup>。

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 21.0 统计软件对数据进行方差分析及相关性比较。

2 结果与分析

2.1 土壤中氮素累积释放量

由图 1 可知,室内恒温培养下,5 种处理在 3 种不同类型土壤中的氮素累积释放量的动态变化趋势大体相同。在整个培养周期,无论在酸性土壤,中性土壤还是碱性土壤中,不同处理的氮素释放累积量都表现为,OCF 最大,MSRF 次之,CSRF1 和 CSRF2 最小(其中酸性土和中性土中 CSRF2>CSRF1,碱性土中 CSRF1>CSRF2)。在酸性土中,OCF、MSRF、CCF 处理的氮素累积释放量相对于 CSRF2 处理,分别上升了 51.99%,35.71%和 12.04%;在中性土中,相较于其他 3 个处理,CSRF1 和 CSRF2 的氮素累积释放量降低幅度分别是 30.81%~56.12%和 30.37%~55.84%;在碱性土壤中,相较于其他 3 个处理,CSRF1 和 CSRF2 氮素累积释放量降低幅度分别是 23.80%~65.21%和 27.02%~66.67%。结果表明,CSRF1 和 CSRF2 这 2 种添加了脲酶硝化双抑制剂的缓释肥的氮素累积释放量均低于其他 3 种处理,且在 3 种不同类型土壤中氮素累积释放量总体上为酸性土最小,中性土次之,碱性土最大。

2.2 土壤中氮素相对累积释放率

由表 2 可知,室内恒温 25 ℃ 培养条件下 3 种土壤介质中 5 种施肥处理的氮素相对累积释放率。在 42 d 培养周期,不同施肥处理在酸性土中的氮素平均相对累积释放率(V)表现为 OCF(0.76%)>MSRF(0.57%)>CCF(0.45%)>CSRF2(0.39%)>CSRF1(0.40%),相较于前 3 种处理,2 种专用脲酶硝化抑

制剂缓释肥养分缓释性能更优,但彼此差异性不大。在整个培养周期,各处理在中性土中的氮素相对累积释放率变化趋势与酸性土较一致,表现为 OCF>MSRF>CCF>CSRF2>CSRF1,2 种专用缓释肥仍无明显差异。在碱性土壤中,不同施肥处理的氮素平均相对累积释放率(V)大小顺序为 OCF(1.17%)>MSRF(0.77%)>CCF(0.58%)>CSRF1(0.44%)>CSRF2(0.43%),CSRF1 和 CSRF2 仍最低,即氮素缓释性最好。碱性土各处理氮素相对累积释放率均高于中性土和酸性土,其中碱性土氮素平均相对释放率达到最高的处理 OCF 相较中性土和酸性土分别提高了 0.32% 和 0.41%(表 2)。由此可见,CSRF1 和 CSRF2 这 2 种添加脲酶硝化抑制剂缓释肥氮素相对累积释放率均低于其他处理,即其养分缓释性能最佳,且在 3 种土壤中氮素相对累积释放率总体上为碱性土最大,中性土次之,酸性土最小。

2.3 土壤中不同形态氮素累积量

由图 2 可知,在 42 d 培养期内,3 种类型的土壤中不同形态的氮素累积量均呈现上升趋势。无论是中性土、酸性土或碱性土,2 种形态的氮素养分累积释放量均表现铵态氮高于硝态氮。14 d 前的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的累积释放量增加幅度较大,原因是由于尿素分解转化加速铵态氮释放累积量,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的累积释放量在 14 d 后明显上升。总体而言,土壤中不同形态的氮素累积量的曲线走势较缓,氮素释放较慢,3 种土壤的 2 种氮素形态累积量表现为碱性土最大,中性土次之,酸性土最小。

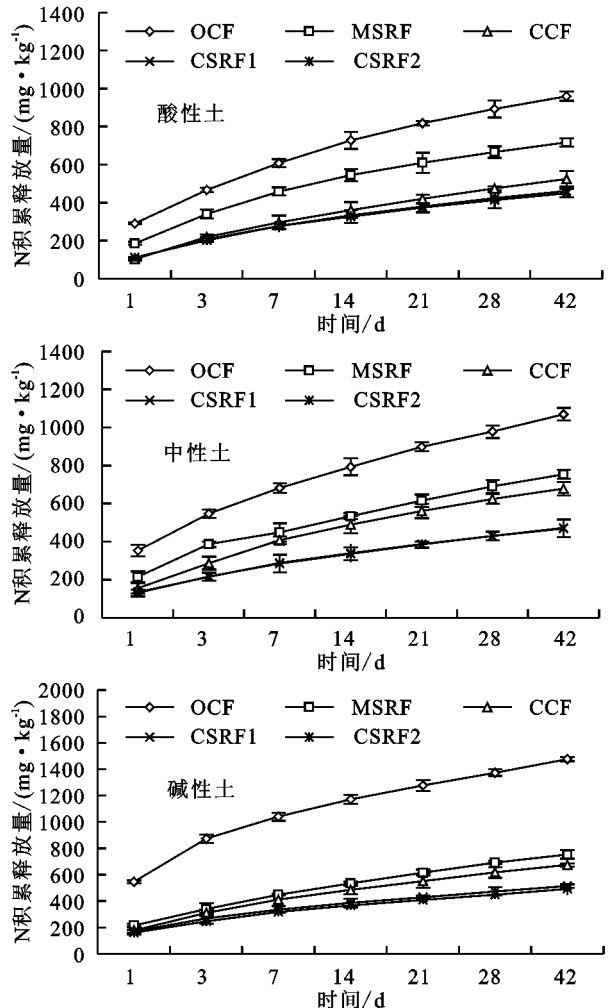


图 1 专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥在 3 种类型土壤中的氮素累积释放曲线

表 2 不同肥料在 3 种类型土壤中氮素养分相对累积释放率

| 土壤类型 | 处理    | 时间/d        |             |             |             |             |             |              | V/%         |
|------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|      |       | 1           | 3           | 7           | 14          | 21          | 28          | 42           |             |
| 酸性土  | OCF   | 9.70±0.22a  | 15.54±0.92a | 20.26±0.31a | 24.25±0.73a | 27.26±0.82a | 29.76±1.02a | 32.00±1.12a  | 0.76±0.01a  |
|      | MSRF  | 6.17±0.17b  | 11.32±0.17b | 15.26±0.62b | 18.13±0.32b | 20.31±0.34b | 22.21±0.56b | 23.90±0.46b  | 0.57±0.03b  |
|      | CCF   | 3.74±0.13c  | 7.95±0.32c  | 10.74±0.53c | 13.12±0.41c | 15.26±0.29c | 17.24±0.33c | 19.06±0.38bc | 0.45±0.01c  |
|      | CSRF1 | 3.90±0.25c  | 7.49±0.13c  | 10.06±0.11c | 11.88±0.26c | 13.57±0.27c | 15.01±0.28c | 16.35±0.25c  | 0.39±0.01c  |
|      | CSRF2 | 4.01±0.21c  | 7.35±0.16c  | 10.07±0.14c | 12.09±0.12c | 13.80±0.11c | 15.37±0.12c | 16.76±0.19c  | 0.40±0.03c  |
| 中性土  | OCF   | 11.76±0.87a | 18.23±0.61a | 22.73±0.51a | 26.46±0.76a | 29.94±0.78a | 32.62±0.98a | 35.65±1.22a  | 0.85±0.05a  |
|      | MSRF  | 7.38±0.33b  | 11.90±0.35b | 15.21±0.52b | 17.83±0.49b | 20.40±0.52b | 22.27±0.54b | 24.13±0.87b  | 0.57±0.01b  |
|      | CCF   | 5.01±0.18c  | 8.35±0.17c  | 11.04±0.24c | 13.65±0.33c | 16.76±0.31c | 18.95±0.51b | 22.31±0.81b  | 0.47±0.01bc |
|      | CSRF1 | 4.75±0.32c  | 7.84±0.24c  | 10.34±0.18c | 12.21±0.20c | 14.00±0.20c | 15.63±0.23c | 15.64±0.32c  | 0.37±0.02c  |
|      | CSRF2 | 4.87±0.14c  | 7.81±0.19c  | 10.45±0.31c | 12.31±0.19c | 14.05±0.18c | 15.65±0.30c | 17.18±0.43c  | 0.41±0.00c  |
| 碱性土  | OCF   | 18.18±0.71a | 29.11±0.76a | 34.65±1.12a | 39.02±1.02a | 42.54±1.37a | 45.79±1.31a | 49.21±1.55a  | 1.17±0.21a  |
|      | MSRF  | 14.91±0.23b | 23.52±0.37b | 25.86±0.43b | 27.53±0.53b | 29.19±0.94b | 30.95±0.88b | 32.51±0.87b  | 0.77±0.01b  |
|      | CCF   | 6.44±0.11c  | 11.25±0.23c | 14.83±0.67c | 17.60±0.31c | 20.07±0.33c | 22.41±0.47c | 24.51±0.43c  | 0.58±0.04c  |
|      | CSRF1 | 6.13±0.04c  | 9.75±0.45c  | 12.20±0.08c | 14.02±0.12c | 15.59±0.24d | 17.15±0.51d | 18.68±0.31d  | 0.44±0.02d  |
|      | CSRF2 | 5.82±0.10c  | 8.98±0.31c  | 11.51±0.12c | 13.33±0.13c | 14.85±0.36d | 16.31±0.21d | 17.89±0.16d  | 0.43±0.03d  |

注:V 为养分平均相对释放率;不同小写字母表示同一类土壤不同肥料处理之间的差异显著性(p<0.05)。下同。

2.4 不同形态氮素在不同土壤中的动力学特性

用一级动力学方程、Elovich 方程和抛物线方程分别进行拟合。由表 3 可知,3 种动力学方程对不同形态氮素的拟合结果都能很好的反映 2 种自制黄瓜缓释肥的释放特性,其中以一级动力学方程进行拟合的效果最

好,相关系数 r=0.952\*\*~0.993\*\*;第 2 是 Elovich 方程,相关系数 r=0.869\*\*~0.994\*\*;第 3 是抛物线扩散方程,相关系数 r=0.731\*~0.988\*\*。另外,表 3 中的 b 值,其大小与变化规律与不同形态氮素累积释放量的大小和变化规律大体相同,因此可以用 b 值来表征

氮素的释放速率。而且,无论是在酸性土、中性土,还是碱性土中, $b$  值的变化规律相同。铵态氮和硝态氮在酸、中、碱土中的  $b$  值,在 Elovich 方程和抛物线方程拟合中都表现为铵态氮的  $b$  值大于硝态氮的,这与

氮素累积释放量的变化特性较为一致。从表 3 还可得出,以一级动力学方程进行拟合 3 种氮形态的最大释放量  $N_0$  值大小表现为总氮>铵态氮>硝态氮,这与 3 种形态氮素累积释放量变化规律表现一致。

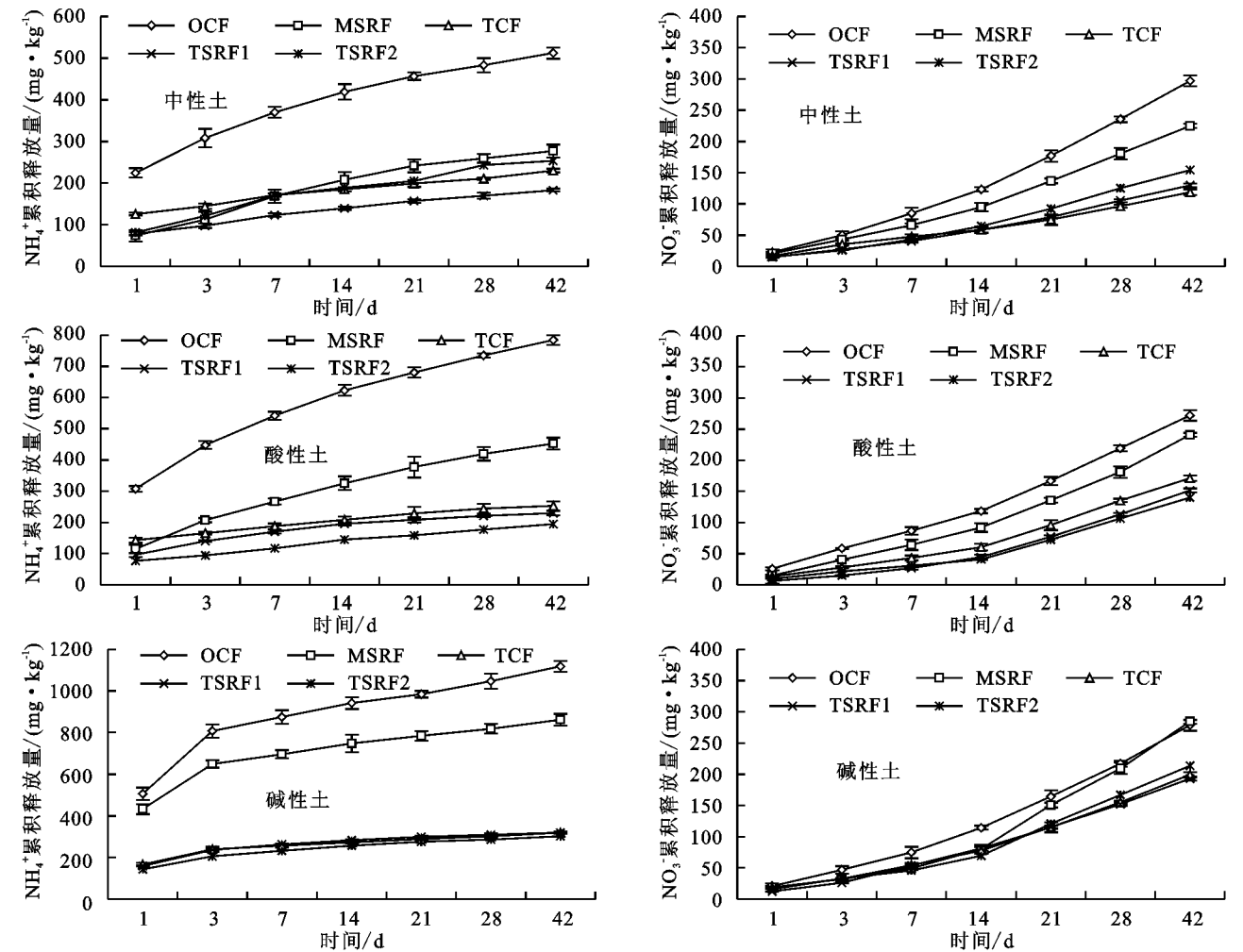


图 2 专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥料对不同处理肥料中的氮素养分累积释放量

表 3 专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥料在 3 种土壤中的动力学特征值

| 土壤类型 | 处理   | 氮形态                      | 一级动力学方程 |       |         | Elvoich 方程 |        |         | 抛物线扩散方程 |        |         |
|------|------|--------------------------|---------|-------|---------|------------|--------|---------|---------|--------|---------|
|      |      |                          | $N_0$   | $k$   | $r$     | $a$        | $b$    | $r$     | $a$     | $b$    | $r$     |
| 酸性土  | CSR1 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 170.460 | 0.033 | 0.981** | 71.192     | 29.397 | 0.972** | 65.401  | 29.202 | 0.981** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 158.540 | 0.355 | 0.981** | 1.571      | 19.354 | 0.914** | 12.175  | 20.118 | 0.866** |
|      |      | Total N                  | 403.600 | 0.186 | 0.956** | 103.542    | 90.352 | 0.909** | 89.518  | 59.886 | 0.905** |
|      | CSR2 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 224.530 | 0.243 | 0.952** | 75.630     | 46.361 | 0.946** | 67.803  | 35.902 | 0.979** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 233.800 | 0.026 | 0.974** | 7.172      | 35.969 | 0.984** | 20.772  | 26.042 | 0.849** |
|      |      | Total N                  | 415.620 | 0.173 | 0.964** | 101.484    | 93.343 | 0.911** | 85.875  | 62.176 | 0.974** |
| 中性土  | CSR1 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 208.550 | 0.407 | 0.964** | 98.484     | 46.145 | 0.944** | 94.929  | 33.392 | 0.908** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 104.680 | 0.024 | 0.984** | 14.792     | 36.611 | 0.994** | 31.592  | 23.522 | 0.870** |
|      |      | Total N                  | 416.470 | 0.194 | 0.973** | 118.858    | 89.791 | 0.869** | 102.283 | 60.239 | 0.988** |
|      | CSR2 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 245.320 | 0.012 | 0.993** | 65.375     | 49.995 | 0.981** | 57.604  | 36.977 | 0.962** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 168.120 | 0.258 | 0.955** | 17.064     | 31.672 | 0.916** | 38.204  | 21.613 | 0.745*  |
|      |      | Total N                  | 417.950 | 0.196 | 0.975** | 120.960    | 89.710 | 0.867** | 104.190 | 60.242 | 0.908** |
| 碱性土  | CSR1 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 293.620 | 0.660 | 0.993** | 175.102    | 40.571 | 0.869** | 173.859 | 35.502 | 0.964** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 108.750 | 0.002 | 0.961** | 19.353     | 32.094 | 0.990** | 35.329  | 26.774 | 0.731*  |
|      |      | Total N                  | 448.290 | 0.277 | 0.961** | 164.386    | 89.959 | 0.936** | 149.671 | 59.832 | 0.913** |
|      | CSR2 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | 270.750 | 0.575 | 0.972** | 149.989    | 41.134 | 0.910** | 146.257 | 36.535 | 0.921** |
|      |      | $\text{NO}_3^--\text{N}$ | 118.920 | 0.006 | 0.967** | 11.401     | 31.766 | 0.975** | 25.554  | 23.589 | 0.761*  |
|      |      | Total N                  | 429.350 | 0.259 | 0.968** | 152.026    | 87.027 | 0.937** | 136.954 | 58.112 | 0.902** |

注: \* 表示显著相关( $p<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ )。

2.5 黄瓜生物量

由表 4 可知,黄瓜植株总干重以 2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥(CSRF2 和 CSRF1)最高和次高,分别为 100.59,97.04 g,比最低的 OCF 处理(66.72 g)增加了 50.76%和 45.44%,且各处理间黄瓜植株总干质量差异显著。根干质量大小顺序为 CSRF2>

CCF>CSRF1>MSRF>OCF,地上部分干重表现为果实>叶>茎,果实总干重以 2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥(CSRF1 和 CSRF2)最高和次高,分别为 67.55,62.05 g,比最低的 OCF 处理(42.45 g)增加了 59.1%和 49.2%,且各处理间黄瓜果实总干物质质量差异显著。

表 4 盆栽不同施肥处理对黄瓜干物质质量的影响

| 处理    | 地上部         |             |             | 根           | 总干质量         |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|       | 茎           | 叶           | 果实          |             |              |
| OCF   | 6.09±0.97c  | 9.82±0.87d  | 42.45±0.50d | 8.36±0.16a  | 66.72±1.32c  |
| MSRF  | 7.53±1.09ab | 11.51±0.82c | 51.84±1.43c | 9.28±0.83a  | 80.16±1.61b  |
| CCF   | 6.87±0.38ab | 13.45±0.49b | 50.50±0.86c | 11.32±0.82a | 82.14±3.25b  |
| CSRF1 | 6.31±0.62bc | 12.02±1.27c | 67.55±0.90b | 11.16±1.42a | 97.04±2.82a  |
| CSRF2 | 8.39±1.47a  | 17.39±1.22a | 62.05±0.82a | 12.76±0.83b | 100.59±4.61a |

2.6 黄瓜 NPK 养分含量

由表 5 可知,缓释肥(CSRF1 和 CSRF2)有效提高了黄瓜 NPK 含量。黄瓜各器官 N 含量均表现为专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥(CSRF2 和 CSRF1)最高,最高的处理 CSRF2 较 OCF、MSRF、CCF 处理分别增加了 25.9%~33.4%(根),11.4%~30.5%(茎),18.8%~27.7%(叶)和 17.3%~27.6%(果实),次高为 CSRF1,相比 OCF、MSRF 和 CCF 处理分别增加了 3.4%~10.1%(根),8.6%~28.1%(茎),8.6%~16.7%(叶)和 3.6%~12.8%(果实)。

由表 5 可知,CSRF2 处理下黄瓜中根、茎和果实 P 含量最高,较 OCF、MSRF、CCF 处理相比分别增加了 8.5%~31.7%(根),11.4%~98.0%(茎),

11.6%~15.6%(果实)。叶则以 CSRF1 处理最高,较 OCF、MSRF、CCF 处理分别增加了 40.9%,15.5%,19.0%,CSRF1 次之,且 2 种专用缓释肥在茎、叶和果实中 P 含量差异性不显著。

黄瓜各施肥处理中以缓释肥有效提高了黄瓜 K 含量(表 5)。以 CSRF2 的黄瓜根、叶和果实 K 含量最高,较 OCF、MSRF、CCF 处理分别增加了 36.7%~26.2%(根),7.1%~16.30%(叶),23.8%~44.1%(果实)。黄瓜茎的 K 含量均以 CSRF1 处理最高 5.52 g/kg,较 OCF、CCF、MSRF 处理分别增加了 10.4%,6.0%,2.0%。2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥在根和果实中 K 含量差异达到显著水平。

表 5 各施肥处理黄瓜 NPK 养分含量

| 处理    | N           |             |            |            | P          |            |            |            | K          |             |            |            |
|-------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
|       | 根           | 茎           | 叶          | 果实         | 根          | 茎          | 叶          | 果实         | 根          | 茎           | 叶          | 果实         |
| OCF   | 3.27±0.03c  | 3.67±0.07c  | 3.36±0.11d | 4.31±0.04c | 1.45±0.03d | 0.99±0.42c | 1.64±0.01c | 2.24±0.14c | 3.17±0.01c | 5.00±0.08c  | 2.46±0.04c | 4.83±0.05e |
| CCF   | 3.42±0.14bc | 4.66±0.06ab | 3.38±0.42d | 4.32±0.03c | 1.54±0.03c | 1.70±0.03b | 2.06±0.01b | 2.25±0.05c | 3.18±0.03c | 5.21±0.04b  | 2.63±0.13b | 5.21±0.04d |
| MSRF  | 3.48±0.06b  | 4.30±0.02b  | 3.61±0.14c | 4.69±0.04b | 1.76±0.04b | 1.76±0.01b | 2.00±0.26b | 2.32±0.01b | 3.75±0.01b | 5.41±0.08ab | 2.67±0.17b | 5.62±0.03c |
| CSRF1 | 3.60±0.01b  | 4.70±0.16a  | 3.92±0.08b | 4.86±0.07b | 1.81±0.05b | 1.91±0.05a | 2.38±0.01a | 2.56±0.05a | 3.79±0.04b | 5.52±0.25a  | 2.79±0.04a | 6.00±0.07b |
| CSRF2 | 4.38±0.03a  | 4.79±0.14a  | 4.29±0.06a | 5.50±0.05a | 1.91±0.05a | 1.96±0.04a | 2.31±0.03a | 2.59±0.05a | 4.00±0.02a | 5.45±0.04a  | 2.86±0.04a | 6.96±0.13a |

2.7 黄瓜 NPK 养分吸收量和养分表观利用率

由表 6 可知,不同施肥处理黄瓜单体内对 NPK 养分吸收量大小顺序为 CSRF2>CSRF1>MSRF>CCF>OCF。对氮吸收量来说,CSRF2 和 CSRF1 较 OCF、CCF、MSRF 分别提高了 92.7%,53.1%,46.5%和 67.6%,33.2%,27.4%。但 2 种专用缓释肥 N 的相对利用效率没有显著差异。对磷吸收量来说,CSRF2 比

OCF、CCF、MSRF 分别提高了 86.7%,40.2%和 41.4%,且 CSRF1 和 CSRF2 的 P 表观利用率差异性不显著。K 的表观利用效率中,2 种硝化双抑制剂缓释肥比普通复合肥增加 28.54%~35.69%。K 吸收量最高为 CSRF2,比 OCF、CCF、MSRF 分别增加了 1.02%,56.2%和 45.5%,K 吸收量在 CSRF1 和 CSRF2 之间差异性达到显著水平。

表 6 盆栽不同施肥处理黄瓜 NPK 养分吸收量

| 处理    | N             |             | P             |             | K             |             |
|-------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|       | 吸收量/mg        | 表观利用效率/%    | 吸收量/mg        | 表观利用效率/%    | 吸收量/mg        | 表观利用效率/%    |
| OCF   | 265.64±5.91d  |             | 129.34±1.96c  |             | 286.14±7.49d  |             |
| CCF   | 334.35±10.55c | 6.37±0.26b  | 172.44±2.61b  | 7.16±0.08b  | 370.27±10.41c | 9.95±0.87d  |
| MSRF  | 349.35±13.18c | 8.75±0.30b  | 170.87±1.544b | 7.86±0.53b  | 397.61±15.80c | 13.76±1.17c |
| CSRF1 | 445.24±26.24b | 18.53±2.12a | 233.79±4.31a  | 19.27±0.79a | 515.96±21.31b | 28.54±2.33b |
| CSRF2 | 511.96±18.29a | 24.20±1.37a | 241.69±6.54a  | 20.02±0.21a | 578.37±28.34a | 35.69±3.21a |

### 3 讨论

氮素利用率低的主要原因有土壤中影响氮肥转化的因素,例如土壤通气状况、土壤含水量、某些微生物活性受其他离子制约从而影响的转化;在施入肥料过程中氨的挥发损失可随施肥量增加而增加,损失率最高可达施氮量的 50%<sup>[1,11]</sup>,在施入氮肥后,降雨或灌水都会降低土壤氮浓度,造成氮素利用率低下<sup>[12]</sup>。硝化抑制剂能够抑制亚硝化细菌和硝化细菌的生长,调控氮肥的供应时间、形式、数量,减少氮肥淋溶和反硝化损失,有效地提高氮肥利用率<sup>[13-18]</sup>。

在本研究中,在硝化抑制剂和脲酶抑制剂作用下,相较普通复合肥、黄瓜专用肥和商品缓释肥,黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥的氮累积释放量在培养期内最低。关于缓控释肥料的抑制剂种类选择以及用量方面,我们在前期做了大量的准备工作<sup>[19]</sup>。硝化抑制剂双氰胺(Dicyandiamide,DCD)含氮量 66.64%,维持高浓度  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量,既能稳定氮又具有抑制土壤中亚硝酸细菌的功能,增效缓效作用兼备<sup>[20]</sup>。同时,双氰胺在土壤中分解后转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{NH}_4^+$ ,不会留下化学残留物而对土壤不利,本身可作为一种缓慢释放的肥料使用<sup>[22]</sup>。脲酶抑制剂(nBPT)可抑制土壤中脲酶活性,抑制尿素水解,延长施肥点尿素的扩散,减少氨的挥发和铵态氮化,专门和尿素配合施用,改善作物对养分的吸收<sup>[21]</sup>。黄瓜专用缓释复合肥中 3 种抑制剂配合施用,取长补短,有效地减少了氮素的损失<sup>[22]</sup>。本研究表明,普通复合肥(OCF)的氮素累积释放率最高 290.97~960.14 mg/kg,其氮的累积释放量最大。普通复合肥的氮素随着天然降水和不当灌溉转移到地表水体中,而  $\text{NH}_3$  一部分也可以干、湿沉降返回地表<sup>[23]</sup>,挥发到大气中的  $\text{NH}_3$  在对流层中由于光化学反应光解产生  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和相当数量的  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[24]</sup>,造成环境污染。陈欢<sup>[25]</sup>通过比较不同脲酶—硝化抑制剂在不同类型上的土壤的抑制效果发现,硝化抑制剂 DMPP 和 DCD 能够较好的抑制水稻土和黑土潮土中的氨氧化效应,使硝化反应滞后。DMPP 在 14 d 内能够较好地抑制硝化反应,DCD 维持抑制效果的时间更长,42 d 后检测显示铵态氮含量仍较高。李香兰等<sup>[26]</sup>指出,氢醌(HQ)和双氰胺(DCD)组合,植株尿素氮回收率最高,还可有效抑制硝化作用。崔理华等<sup>[12]</sup>研究发现,氮肥与双氰胺配施比单施氮肥可明显降低矿质氮库铵态氮消失量 74.1% ( $p < 0.01$ ),显著提高氮肥利用率,抑制了氮的硝化反应,抑制率为 35.5%~98.7%,同时配施双氰胺+硫代硫酸钾处理显示铵态氮增加,氮的硝化反应得到抑制,抑制率可达 82.2%~103.5%,平均延滞硝化作用时间达 20 d 以上。Xu 等<sup>[27]</sup>研究表明,施

肥 60 d 左右,DCD 和 DCD+HQ 处理还在起作用。在整个培养期内,2 种专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥在 3 种土壤中氮养分释放累积量均以铵态氮大于硝态氮。该结果与陈欢<sup>[25]</sup>、李香兰等<sup>[26]</sup>的研究早前报道相似。这可能是因为双氰胺等其他硝化抑制剂能同时抑制土壤的硝化反应和反硝化反应,反应过程被抑制后,氮肥以  $\text{NH}_4^+$  的形式长时间留持于土壤中。在本研究中还发现 2 种不同形态氮素累积量大小顺序为碱性土最大,中性土次之,酸性土最小,因此表明土壤 pH 与不同形态氮素累积量存在一定联系。

通过观察数据拟合的相关系数  $r$  和变幅,可发现关于不同土壤中脲酶硝化双抑制剂缓释肥在不同土壤中的各形态氮素养分的累积释放量的拟合方程中,一级动力学方程效果最好( $r=0.952^{**} \sim 0.993^{**}$ ),其次是 Elovich 方程( $r=0.869^{**} \sim 0.994^{**}$ ),最后是抛物线扩散方程( $r=0.731^{*} \sim 0.988^{**}$ )。拟合方程中的  $b$  值与缓释肥氮素释放累积量变化规律基本一致,可反映氮素的释放速率<sup>[1]</sup>。

在本研究中,在各施肥处理间黄瓜总干物质重和果实干物质重存在显著差异,表现为黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥处理最高,这与黄旭等<sup>[14]</sup>对缓释肥应用效果研究结果类似。蔬菜属喜肥性作物,为了提高其种植效益,菜农大量且频繁施肥,使得氮肥施用量超出普通大田作物数倍甚至数十倍之多,但由于施入土壤过程中氨易挥发,造成蔬菜氮素利用率低<sup>[1,11]</sup>。脲酶、硝化抑制剂能够抑制脲酶活性和亚硝化细菌和硝化细菌的生长,调控氮肥的供应时间、形式、数量,减少氮肥淋溶和反硝化损失,延长铵态氮在土壤中停留的时间,有效降低氨挥发和提高氮肥利用率<sup>[14-18]</sup>。本研究表明,相较于普通复合肥,黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥更有利于提高氮磷钾养分的吸收和利用率。该结果与早前报道<sup>[5]</sup>类似。原因可能是黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥中添加了抑制剂,抑制了代谢酶活性,减缓养分释放速度,此外,富含有机质的黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥通过调控土壤有效养分与作物养分需求间的协调平衡,最终提高肥料养分利用效率<sup>[28]</sup>。

### 4 结论

(1)黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥相较于普通复合肥明显改善了氮素释放特性,降低了氮素累积释放量和氮素累积释放率。在整个培养期内,无论在酸性土壤,中性土壤还是碱性土壤中,不同处理的氮素释放累积量都表现为,OCF 最大,MSRF 次之,CSRF1 和 CSRF2 最小。CSRF1 和 CSRF2 添加脲酶硝化抑制剂缓释肥氮素相对累积释放率均低于其他处理,即其养分缓释性能最佳,且在 3 种土壤中,2 种添加脲酶硝化抑

制剂缓释肥(CSRF1 和 CSRF2)氮素相对累积释放率总体上为碱性土最大,中性土次之,酸性土最小。黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥铵态氮和硝态氮的释放规律特性可用一级动力学方程拟合。

(2)黄瓜专用脲酶硝化双抑制剂缓释肥相较于普通复合肥明显增加了黄瓜产量,且各处理间黄瓜植株总干质量与果实总干质量差异显著。缓释肥 CSRF1 和 CSRF2 有效提高了黄瓜 NPK 含量,黄瓜各器官中的养分 N 最高均为缓释肥 CSRF2,次高为 CSRF1; CSRF2 处理下黄瓜中根、茎和果实 P 含量最高,叶则以 CSRF1 处理最高;以 CSRF2 的黄瓜根、叶和果实 K 含量最高,黄瓜茎的 K 含量以 CSRF1 处理最高。由研究结果可知,黄瓜对养分 NPK 的吸收以及氮、磷、钾养分的相对利用率有了明显提升。

(3)由于本研究只是恒温培养与土培试验得出的初步结论,与大田试验结果是否存在显著差异以及抑制剂对作物生理生化某些现象的机理亟待进一步验证与研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈序根,王崇力,徐卫红,等.脲酶硝化双抑制剂缓释肥提高番茄产量及 NPK 养分吸收[J].农业工程学报,2015,31(21):168-176.
- [2] 唐小付,龙明华,赵晓美,等.生物有机肥在蔬菜生产上的应用效果[J].长江蔬菜,2010(21):46-48.
- [3] 杨睿.不同肥料对番茄生长生理及栽培基质理化性状的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2015:9-18.
- [4] 贺博.提高肥料利用率几点建议[J].农业开发与装备,2013(3):115-115.
- [5] 朱国梁,毕军,夏光利,等.不同缓释肥料对黄瓜产量、品质及养分利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):68-73.
- [6] 王广勇,徐启来,喻武远,等.硫包衣尿素(SCU)在江苏省沿海农场对小麦的增产效应及氮素利用率的影响研究[C]//中国化工信息中心.2010 第三届国际缓释肥料产业发展(汉枫)论坛论文集.北京:中国化工信息中心,2010:270-272.
- [7] Sanderson R, Fillmore A E. Slow-release nitrogen fertilizer in carrot production on Prince Edward[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2012, 92(6): 1223-1228.
- [8] 董燕.缓控释复合肥料养分释放特性与生物效应研究[D].重庆:西南大学,2007:15-28.
- [9] 李锋,郭立君,严国锋,等.晚稻施用缓控释肥料的效应研究[J].湖南农业科学,2011(15):77-78.
- [10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版,2000.
- [11] 阮云泽,张茂星,陈鹏,等.热带人工橡胶林地砖红壤中

- 氮挥发规律的研究[J].土壤,2014,46(3):466-469.
- [12] 宁建凤,崔理华,艾绍英,等.2种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):144-151.
- [13] Chaves B, Opoku A, Sde N, et al. Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(1): 62-68.
- [14] 黄旭,唐拴虎,徐培智,等.不同种类缓控释肥料对水稻产量及养分利用率的影响[J].广东农业科学,2010,37(8):95-96.
- [15] 串丽敏.硝化—脲酶抑制剂对土壤氮素迁移转化及油菜生长的影响[D].河北保定:河北农业大学,2010:10-22.
- [16] 费频频.脲酶—硝化抑制剂对稻田生态系统氮素流向的影响研究[D].杭州:浙江大学,2011:13-31.
- [17] 张文学,孙刚,何萍,等.脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2013(6):1411-1419.
- [18] 曾后清,朱毅勇,王火焰,等.生物硝化抑制剂:一种控制农田氮素流失的新策略[J].土壤学报,2012,49(2):382-388.
- [19] 殷建祯,俞巧钢,符建荣,等.不同作用因子下有机无机配施添加 DMPP 对氮素转化的影响[J].土壤学报,2013,50(3):144-153.
- [20] 俞巧钢,陈英旭.DMPP 对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J].中国环境科学,2010,30(9):1274-1280.
- [21] 俞巧钢,陈英旭.尿素添加硝化抑制剂 DMPP 对稻田土壤不同形态矿质态氮的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1357-1363.
- [22] Yu Q G, Cheng Y X, Ye X Z, et al. Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns [J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 872-878.
- [23] 韩桂琪,张海波,徐卫红,等.蔬菜专用缓控释肥料 N 释放动态研究[C]//中国农学会.农产品质量安全与现代农业发展专家论坛论文集.北京:中国科学技术出版社,2011:39-46.
- [24] 郑福丽,石元亮.抑制剂对尿素转化及土壤中氮的影响研究[J].土壤通报,2007,38(2):412-414.
- [25] 陈欢.脲酶—硝化抑制剂的效果比较及 DMPP 对氮素肥力与小麦根系微域分布的影响[D].南京:南京农业大学,2010:11-27.
- [26] 李香兰,徐华,蔡祖聪.氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J].土壤学报,2009,46(5):917-924.
- [27] 倪秀菊,李玉中,徐春英,等.土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展[J].中国农学通报,2009,25(12):145-149.
- [28] 邱现奎.粉煤灰包膜缓释肥的制备及其对作物生长的影响研究[D].山东泰安:山东农业大学,2011:13-27.