

# Study on the Evaluation of Sustained-release Effect of Polyurethane Coated Sustained-release Selenium Fertilizer

Luo Qin<sup>1</sup> Lu Yapu<sup>2,3</sup> Zhang Zezhou<sup>2,3</sup> Yin Xuebing<sup>1,2,3</sup>  
Wang Zhangmin<sup>2,3\*</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei;
2. Suzhou Setek, Co, LTD, Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou;
3. Nanjing Hengbaotian Functional Agricultural Industry Research Institute, Nanjing

**Abstract:** Many crops have the absorption peak of trace element selenium(Se) in their specific growth period. In order to prepare functional fertilizers matching the release rate of selenium with the absorption rate of crops, the sustained release effect of selenium was evaluated by using polyurethane coated sustained release selenium fertilizer. In this study, water purification experiments were conducted on several kinds of polyurethane selenium fertilizer with different coating quantities at 25 °C and 100 °C to evaluate the sustained release effect of Se element. The results showed that the dissolution rate of Se in fertilizers at 25 °C and 100 °C showed the following laws: the overall trend of the Se release rate in each group was relatively rapid at the beginning, and then tended to be stable, showing three different stages: the rapid release period,

linear release period and declining release period. The Se release rates for uncoated Se fertilizer and 2% coated Se fertilizer did not meet the standard of slow-release fertilizer in the early 24 hours, and there was no significant difference between the two groups. The released Se rate for coated fertilizer with 4% and 6% polyurethane could meet the standard of sustained-release fertilizer, and the sustained-release period was more than 40 days, and there was no significant difference between the two treatments. The dissolution rate method for Se in fertilizer at 20 °C can be replaced by the more rapid dissolution rate method for Se in water at 100 °C. Taking all factors into consideration, 4% coated fertilizer was the optimal solution.

**Key words:** Polyurethane; Selenium; Slow-release fertilizer; Assessment test

Received: 2020-09-16; Accepted: 2020-09-23; Published: 2020-10-20

# 聚氨酯包膜缓释硒肥缓释效果评估的研究

罗 琴<sup>1</sup> 鲁亚普<sup>2,3</sup> 张泽洲<sup>2,3</sup> 尹雪斌<sup>1,2,3,4</sup>

王张民<sup>2,3\*</sup>

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥;
2. 苏州硒谷科技有限公司江苏省硒生物工程技术研究中心, 苏州;
3. 南京恒宝田功能农业产业研究院, 南京;
4. 农业农村部富硒产品开发与质量控制重点实验室, 安康

邮箱: lq960528@mail.ustc.edu.cn

**摘 要:** 淮山、木薯等作物在其特定生育期对微量元素硒存在吸收高峰, 为制

备硒释放速率与作物吸收相匹配的功能型肥料,本研究利用聚氨酯包膜缓释硒肥进行了硒元素的缓释效果评估,分别在 25℃和 100℃下,对几种不同包膜量(未包膜、2%、4%和 6%)的聚氨酯包膜缓释硒肥进行静水评估实验,评价各组肥料中硒元素的缓释效果。结果表明,25℃和 100℃下肥料中硒的溶出率都呈现以下规律:各组肥料中硒的溶出总体为刚开始较为迅速溶出,然后趋于平稳释放,具有快速释放期、线性释放期、衰退释放期三个明显的阶段。未包膜硒肥与 2%包膜量硒肥,24 小时初期硒的释放比例不符合缓释肥标准,且两者无显著性差异。4%与 6%包膜量硒肥符合缓释肥标准,缓释期在 40 天以上,两者也无显著性差异。所以 25℃和 100℃下进行肥料中硒的溶出率评价,两种方法无显著差异,因而可用更为快速的 100℃水中溶出率法代替现有的 25℃水中溶出率法。综合各方面因素,4%包膜量硒肥是更佳的工艺。

**关键词:** 聚氨酯; 硒; 缓释肥; 评估实验

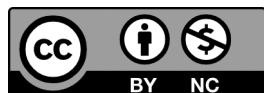
收稿日期: 2020-09-16; 录用日期: 2020-09-23; 发表日期: 2020-10-20

---

Copyright © 2020 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



硒是人体必需的微量元素之一,也是一种与人体多种疾病相关的、必需非金属微量元素,能调节机体免疫力,具有抗衰老、清除体内有害自由基的功能。硒被国内外科学家们誉为人类“抗癌之王”“长寿元素”<sup>[1]</sup>。《中国居民膳食营养素参考摄入量(2013 版)》中,成人硒的参考摄入量  $60 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ,而我国居民的平均硒摄入量约为  $36 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ,远低于推荐水平<sup>[2]</sup>。国际微量营养组织

把这种矿物营养缺乏问题称作“隐性饥饿”。

功能农业为解决这种“隐性饥饿”问题提供了方法,功能农业由赵其国院士在 2008 年全球首次提出。功能农业指的是在天然富含有益成分的土壤、生境中生长或通过生物营养强化技术及其他生物技术培育,实现农副产品中一种或多种有益健康成分,基于人类健康需求做出标准化优化的生产实践<sup>[3]</sup>。目前,富硒产业是功能农业的重要研究方向之一,也是当下热门研究和应用领域。除去天然富硒区生产的天然富硒产品,应用外源硒强化剂,即施加硒肥生产富硒农产品,是富硒功能农业产业的重要支撑技术。

传统的施肥方式普遍存在使用过量、利用率低等问题。主要表现在:平均施肥量高,施肥量不均衡,施肥方式不科学,有机肥利用率低<sup>[4]</sup>。而功能农业提出的根际精准给肥是根据作物的生长特性及土壤性质等因素,以各种科学手段优化肥料性能与投入方式,从而获得更高的肥料利用率<sup>[3]</sup>。在诸多提高肥料利用率方式中,从肥料本身着手的缓控释肥料成为肥料创新研究的热点,受到广泛重视。

缓释肥料指肥料施入土壤后转变为植物有效态养分的释放速率比速溶性肥料小<sup>[6]</sup>,延长肥料有效养分的释放期,可减少肥料的流失率,提高其利用率;缓释肥料进一步优化可得到控释肥料,控释肥料是指以各种调控机制,使肥料按照作物对养分吸收的规律释放养分<sup>[7]</sup>,更好地提高肥料利用率。缓控释肥料有多种品类,其中包膜型缓控释肥料是现阶段研究的热点。

我国学者在聚氨酯包膜缓控释肥料研究领域也获得了丰硕的成果。燕山大学王国喜等<sup>[8]</sup>以多亚甲基多苯基异氰酸酯与蓖麻油反应,制备包膜材料,并探究了不同包膜量对缓控释效果的影响。武汉理工大学王勇等<sup>[9]</sup>以天然具备强吸水能力的魔芋作为掺杂,合成具有生物降解性的聚酯包膜材料,并通过控制掺杂魔芋粉比例、水的比例及包膜材料厚度,从而控制包膜材料降解速率及养分释放速率。宁夏回族自治区土壤与植物营养重点实验室研究员赵营等<sup>[10]</sup>以聚氨酯为主要材料,以石蜡、改性高岭土、氧化钙等为组合成分,以滚筒流化床包膜法制作聚氨酯包膜尿素,发现其氮肥利用率显著提高,可达 32.5% ~ 40.0%。山西化工设计院的宫涛等<sup>[11]</sup>通过无溶剂喷涂成型法制造聚

氨酯包膜肥,其包膜效果好,表面光滑度、耐磨性、均匀性等机械性能指标良好。然而,关于包膜缓释硒肥的研究较少。本研究制备了 2%,4%,6% 三种包膜量的聚氨酯包膜硒肥,通过静水评估试验探究聚氨酯包膜量对肥料中硒元素释放规律的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

所用的包膜肥料的肥芯为苏州硒谷科技有限公司提供的基准硒肥,产品代码 SETEK-BF-S02,由含硒矿石活化得来,主要成分为硒酸盐、亚硒酸盐和粘结剂,总硒含量约  $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,形态为颗粒状,粒径约 3 mm。包膜肥料的膜材料主要为淀粉改性聚氨酯及固化剂,采用转鼓流化床工艺法将包膜材料喷涂至肥芯表面成型,由山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室提供,并委托其制备相应的包膜缓释硒肥。试验研究材料包括 4 种聚氨酯包膜量的硒肥,分别是未包膜硒肥(CK 组)、2% 包膜量包膜硒肥、4% 包膜量包膜硒肥、6% 包膜量包膜硒肥。

采用静水溶出率法进行缓释肥料中硒溶出率评估试验。开展了两种方法的对比研究,将 25℃ 条件下试验称为慢速水中溶出率法,100℃ 条件下试验称为快速水中溶出率法。慢速水中溶出率法和快速水中溶出率法的方法如下:准备蒸馏水清洗干净的 100 目尼龙纱网、橡皮筋、细绳并晾干备用。用分析天平称取待测肥料 10.00 g,置于 100 目尼龙纱网做成的小袋中,用橡皮筋将小袋封口,在橡皮筋处缠上细绳,将小袋放置于 250 ml 锥形瓶中,将细绳线头留在锥形瓶外,用量筒加入 25℃ (或 100℃) 的蒸馏水 200 ml,迅速用封口膜密封,然后静置培养,25℃ 使用生化恒温培养箱,100℃ 使用水浴锅。

### 1.2 样品采集和处理

25℃ 评估条件下在试验第 1、3、6、10、18、20、24、30、34、40 d 采集溶液样品。100℃ 评估条件下取样时间为第 1、3、6、10、18、20、24 h。取样时,将锥形瓶瓶上下颠倒三次,使瓶内的液体硒浓度均匀,然后移除封口膜,用细

绳提起小袋悬于瓶口上方，用少量蒸馏水冲洗三次，洗液流于锥形瓶中，此时瓶中即为溶出液，然后迅速将小袋移入新的已加入 200 ml，25℃ /100℃ 蒸馏水的锥形瓶中，按照同样方法封口，在 25℃ /100℃ 条件下继续培养，将原瓶中的溶出液移入 250 ml 容量瓶，冷却至室温后定容，得到待测液。待测液的消解采用  $\text{HNO}_3$ :  $\text{HClO}_4$  (4 : 1) 混酸—电热板消解。

以上待测液总硒含量用以氢化物原子荧光光谱法 (GB5009.93-2017) 检测，所用仪器为 Rayleigh AF-2000。

### 1.3 数据处理

释放速率指的是释放到浸提液中的硒含量百分比和时间的比值，表示硒释放的快慢。释放比例指的是肥芯累积释放到浸提液中的硒含量与肥料中总硒含量的比值，表示硒释放速率的变化情况。微分释放速率指的是释放速率随时间的变化。数据分析和处理使用 SPSS 22.0 和 Origin 9.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 包膜硒肥的慢速水中溶出率法结果分析

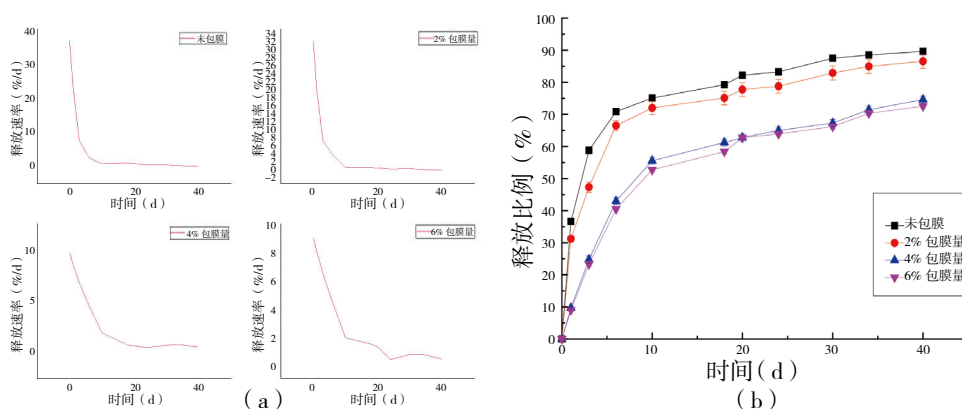


图 1 慢速水中溶出率试验释放曲线 (a) 及微分释放速率曲线图 (b)

Figure 1 Experimental release curve (a) and differential release rate curve (b) of slow water dissolution rate

图 1 给出了在 25℃ 条件下, 不同包膜量硒肥在蒸馏水中静置浸提, 硒元素释放到溶液的比例随时间变化情况, 以及相对应的微分释放速率, 其横坐标为时间 (d), 纵坐标为释放比例 (%) 或释放速率 (%/d)。其中释放比例, 指的是肥芯累积释放到浸提液中的硒的量与肥料中总硒含量的比例。

由释放比例图可知, 未包膜硒肥 (对照组) 前 10 天属于快速释放期, 24 小时初期释放比例为 36%, 6 天释放比例约为 71%, 前 10 天累积释放比例约为 75%, 10 天之后的释放速率变得平缓, 28 天释放比例约为 85%, 40 天释放比例约为 90%, 后 30 天累积释放比例约为 15%。由其微分释放速率图可知, 其释放速率呈单调递减, 前 10 天释放速率快且迅速下降, 随后释放速率趋于平缓。

2% 包膜量包膜硒肥前 10 天为快速释放期, 24 小时释放比例约为 31%, 6 天释放比例约为 67%, 前 10 天累积释放比例约为 72%, 10 天之后的释放趋于平缓, 其 28 天释放比例约为 80%, 40 天释放比例约为 86%, 后 30 天累积释放比例约为 16%。根据其微分释放速率图, 其释放速率为单调递减, 前 6 天释放速率快且迅速下降, 随后趋于平缓。

4% 包膜量包膜硒肥前 10 天是快速释放期, 其 24 小时释放比例约为 10%, 前 3 天硒元素释放比例约为 25%, 随后较为缓慢地释放, 10 天释放比例约为 56%, 28 天释放比例约为 66%, 40 天释放比例约为 74%, 后 30 天养分累积释放比例约为 18%。根据其微分释放速率图, 其释放速率为递减趋势, 前 6 天释放速率大且迅速下降, 随后释放速率趋于平缓。6% 包膜量包膜硒肥的快速释放期同样为 10 天, 24 小时释放比例约为 9%, 前 10 天养分累积释放比例约为 45%, 随后释放速度趋于平缓, 10 天释放比例约为 54%, 28 天释放比例约为 57%, 40 天释放比例约为 58%, 后 30 天累积释放比例约为 13%。由其微分释放速率图可知, 其释放速率呈递减趋势, 前 3 天释放速率快且下降迅速, 随后趋于平缓。



## 2.2 包膜硒肥的快速水中溶出率法结果分析

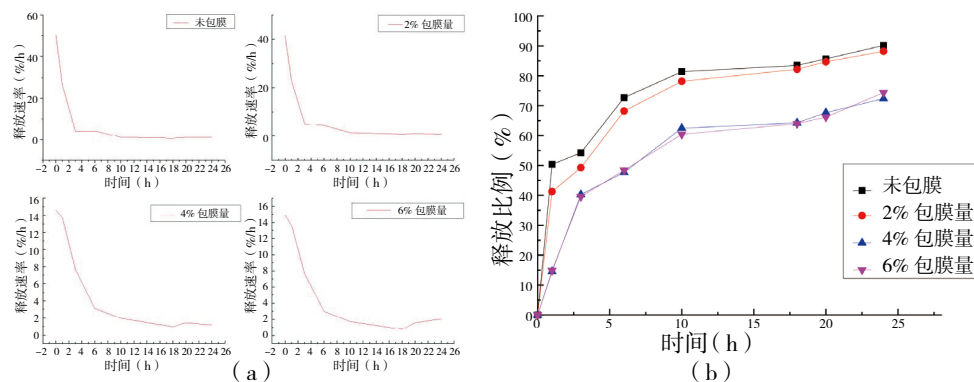


图 2 快速水中溶出率试验释放曲线 (a) 及微分释放速率曲线图 (b)

Figure 2 Experimental release curve (a) and differential release rate curve (b) of rapid water dissolution rate

图 2 给出了在 100℃条件下, 未包膜硒肥和不同包膜量包膜硒肥在蒸馏水中静置浸提, 硒元素释放比例及速率随时间的变化情况, 图中横坐标为时间 (h), 纵坐标为释放比例 (%) 或释放速率 (%/h)。

由试验结果可知, 未包膜肥料 (CK 组) 前 6 小时释放比例约为 73%, 随后较为平缓地释放, 到 24 小时的释放比例约为 90%。由其微分释放速率图可知, 其释放速率前 6 小时较快且逐渐下降, 随后趋于平稳, 在 18 小时附近有略微上升。

2% 包膜量包膜肥料前 6 小时释放比例约为 68%, 随后释放趋于平缓, 24 小时总释放比例约为 88%。由其微分释放速率图可知, 其释放速率前 6 小时较快且快速下降, 随后速率平稳衰减。

4% 包膜量包膜肥料前 6 小时释放比例约为 47%, 到 24 小时的释放比例约为 72%。根据微分释放速率图, 其释放速率前 10 小时较快且快速下降, 随后趋于平稳, 在 18 小时附近有略微上升趋势。

6% 包膜量包膜肥料前 6 小时释放比例约为 48%, 随后较为平缓地释放, 到 24 小时的释放比例约为 74%。根据器微分释放速率图, 其释放速率前 10 小时较快且快速下降, 随后释放速率快速衰减。



上述结果表明在 100℃条件下，后两者的缓释效果优于前两者。各组肥料的释放趋势和慢速水中溶出率法基本一致，区别在于高温条件下，释放速率整体加快，这提示了用快速水中溶出率法替代慢速水中溶出率法的可行性。

## 2.3 快速与慢速水中溶出率法数据拟合结果

由于 100℃温度条件下快速水中溶出率法的释放期只需要几十个小时，而 25℃温度条件释放期大于 40 天，两者的自变量——时间（t）的区间不同。因此要想比较这两种方法，关键在于看当两种方法下的因变量——释放比例 X 相同时，两者所处的时间  $t_1$  和  $t_2$  之间是否有可循的关系。但根据实验结果数据，很难找到两者释放比例相同的数据点，因此需要先对两者的曲线拟合，然后找寻之间的关系。

S 型逻辑增长模型其大致趋势是初期增长缓慢、中期增长迅速、随后减速并达到饱和。而包膜缓释肥的释放，理论上也是初期迟滞期，因为膜材料的保护作用而释放缓慢，随后随着膜的溶胀，释放速度增加并达到最大，最后因为肥料养分逐渐耗尽释放速度逐渐衰减，其趋势相契合。

本试验用 S 型逻辑增长曲线进行拟合，拟合结果如图 3，由结果可知慢速水中溶出率法和快速溶出率法的 S 型拟合曲线的  $R^2$  值都在 0.95 以上，是一种较好的拟合方式。

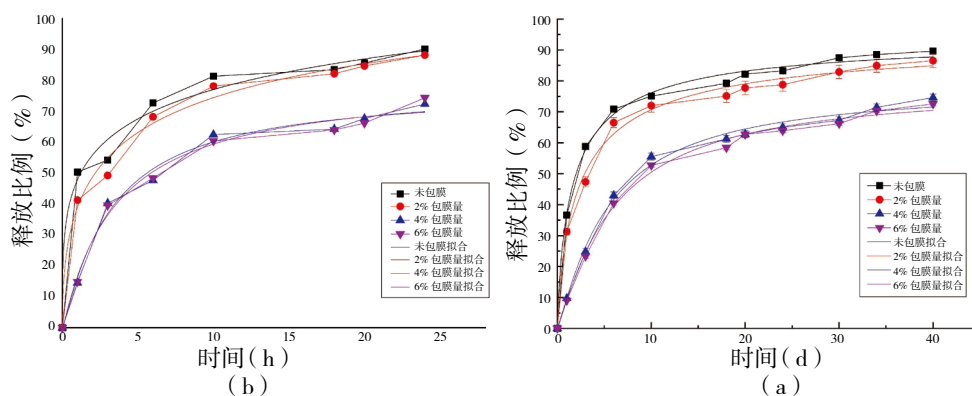


图 3 慢速水中溶出率法 (a)，快速水中溶出率法 (b) 释放曲线的 S 型逻辑增长方程拟合

Figure 3 The slow water dissolution rate method (a) and the fast water dissolution rate method (b) were fitted with the S-type logical growth equation of the release curve

用 S 型拟合曲线进项拟合得到慢速水中溶出率法的时间  $t_{1n}$ , 和快速溶出率法的时间  $t_{2n}$  值, 以  $t_{1n}$  为因变量,  $t_{2n}$  值为自变量, 进行线性拟合, 结果如表 1 所示。

表 1  $t_{1n}$  和  $t_{2n}$  值拟合结果

Table 1 Fitting results of  $t_{1n}$  and  $T_{2n}$  values

处理	线性拟合方程	$R^2$
未包膜肥料组	$t_1=1.102t_2+0.315$	0.995
2% 包膜量组	$t_1=1.489t_2-0.179$	0.987
4% 包膜量组	$t_1=1.317t_2+0.709$	0.997
6% 包膜量组	$t_1=1.552t_2+0.413$	0.999

在处理数据中, 发现 4% 包膜量肥料和 6% 包膜量肥料组的拟合方程, 解析释放 80% 以上比例时的时间无实根, 这表明这两组肥料的缓释效果导致理论释放比例上限小于 80%。

同时从表 1 可知, 慢速和快速溶出率法之间具有很强的相关性, 以线性方程拟合,  $R^2$  值高达 0.98 以上。表明在高温条件下, 其释放速度总体加快且趋势几乎不变。

### 3 讨论

#### 3.1 慢速溶出率法下不同包膜量肥料硒元素释放效率分析

由试验结果可知, 未包膜硒肥并非立即溶于水中, 有一定的缓释效果, 但其 24 小时初期养分释放比例达不到小于 15% 的标准, 其大部分养分在 6 天左右内释放, 在初期由于扩散作用, 释放到溶液中的硒主要为可溶的硒酸盐、亚硒酸盐以及微量的有机硒多糖、硒代氨基酸等, 因为含硒矿石晶格的固定作用以及粘结剂的吸附作用, 剩余硒元素不能立即释放<sup>[12]</sup>。随着时间延长, 在扩散机制下, 粘结剂和含硒矿石逐渐溶解, 逐渐释放剩余部分硒元素<sup>[13]</sup>。但始终有部分硒养分无法溶解于水。

2% 包膜量包膜硒肥具有一定的缓释效果, 但其 24 小时初期养分释放比例

达不到小于 15% 的标准, 其大部分养分在 6 天左右内释放, 因此达不到缓释肥标准, 且与未包膜硒肥组无显著性差异, 这说明包膜材料的缓释作用十分有限。这可能是因为肥料肥芯的球形度、规整度差且表面不平整原因所致, 在包膜量较少的情况下无法保证包膜材料的覆盖度以及机械性能<sup>[7]</sup>, 膜材料浸入水中后即迅速破裂, 随后遵循未包膜硒肥的释放规律。

4% 包膜量包膜硒 24 小时初期释放比例为 10%, 初期释放比例小于 15%, 且 28 天释放比例小于 75%, 达到缓释肥标准, 缓释期大于 40 天, 其缓释效果与 2% 包膜量硒肥组存在明显差异。这证明 4% 包膜量的包膜材料能较好地覆盖肥料肥芯, 起到了相应的缓释效果。

6% 包膜量包膜硒肥初期释放比例为 9%, 满足初期释放比例小于 15% 的标准, 且 28 天释放比例小于 75% 满足缓释肥标准, 其缓释期大于 40 天。但其释放曲线与 4% 包膜量硒肥组无较大差异。这可能主要是因为同样材料与工艺情况下, 包膜层厚度是决定缓释效果的因素, 若假设包膜肥料为球体, 根据球体体积公式, 包膜材料体积 (即包膜量) 的增加与包膜肥料颗粒半径 (即包膜厚度) 的增加并非线性关系, 而是边际递减的<sup>[14]</sup>。因此, 综合考虑缓释效果、成本等因素, 4% 包膜量是较为理想的包膜量。

### 3.2 快速与慢速水中溶出率法的比较

根据两种方法的浸提结果所建立的线性函数关系, 慢速和快速溶出率法之间具有很强的相关性。这表明在高温条件下, 其释放速度总体加快且趋势几乎不变, 快速法条件下释放期的 1 小时, 约相当于慢速法条件下的 1 ~ 2 天, 所以可用 100℃ 快速浸提法较为准确地预测在 25℃ 温度条件下的富硒缓释肥养分释放期, 用快速法替代慢速法可以极大缩减试验周期, 在一定程度上降低长周期试验带来的误差, 从而节省科研资源。

## 4 结论

利用聚氨酯为包膜材料制备不同包膜量的包膜硒肥, 进行了两种温度下的水中溶出率法评估试验, 并测定了其硒肥释放曲线而得出以下结论: 各组肥料

的释放曲线总体趋势都为刚开始较为迅速,然后趋于平稳释放,具体表现为快速释放期、线性释放期、衰退释放期。未包膜硒肥与 2% 包膜量包膜硒肥,24 小时初期释放比例不符合缓释肥标准,且两者无显著性差异。4% 与 6% 包膜量包膜硒肥符合缓释肥标准,缓释期在 40 天以上,且两者无显著性差异。综合考虑,4% 包膜量硒肥是更佳的工艺。通过对比 25℃ 和 100℃ 下水中溶出率评估法,表明两者具有显著一致性,100℃ 条件下浸提 1 小时,约相当于 25℃ 条件下 1 ~ 2 天。因此可用更为快速的 100℃ 静水浸提代替 25℃ 静水浸提,从而缩短试验周期,节约研究资源。

本研究对在实际生产应用中的特定作物的包膜缓释硒肥,有一定的指导意义。根据前期研究,淮山在特定生育期对硒有吸收高峰期,所以可以对其施加缓控释硒肥来提高硒肥利用率,增强淮山的硒含量。这就需要测定淮山对硒的吸收规律,研制出适合淮山生长的释硒肥,并评估其缓释效果和实际应用价值。所以,此研究可为制备一种适合淮山生长使用的缓控释硒肥提供了理论基础。

## 基金项目

广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17202027)。

## 参考文献

- [1] 汤超华,赵青余,张凯,等.富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展[J].中国农业科学,2019,52(18):3122-3133.
- [2] 王立平,刘永贤.我国富硒农产品标准的现状、问题与对策[J].农产品质量与安全,2017(5):24-27.
- [3] 赵其国,尹雪斌,孙敏,等.2008—2018 年功能农业的理论发展与实践[J].土壤,2018,50(6):1061-1071.
- [4] 新华网.我国化肥使用量占全球三成凸显“肥”之烦恼[EB/OL].  
[2015-03-17]. <http://finance.chinanews.com/ny/2015/03-17/7137028.shtml>.
- [5] 谷娜,侯艳秋.山药多糖及其硒多糖抗氧化性的比较研究[J].微量元素与健康研究 2016,33(5):41-43.

- [6] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释缓释肥的研究现状和进展 [J]. 化肥工业, 2001, 28 (5): 27-30, 63.
- [7] 许秀成, 李萍, 王好斌. 包裹型缓释 / 控释释放肥料专题报告第一报概念区分及评判标准 [J]. 磷肥与复肥, 2000, 15 (3): 1-6.
- [8] 王国喜, 李青山, 茹铁军, 等. 聚氨酯缓 / 控释肥制备与膜层表征 [J]. 聚氨酯工业, 2010, 25 (3): 16-48.
- [9] 王勇. 高分子材料与土壤化肥 [J]. 功能材料, 2004, 35 (1): 2511-2513.
- [10] 赵营, 赵天成, 刘汝亮, 等. 几种聚氨酯包膜尿素的氮素释放特征研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2016 (3): 60-66.
- [11] 宫涛, 杨树竹. 聚氨酯包膜缓释肥的制备及性能的研究 [J]. 聚氨酯工业, 2014 (2): 33-36.
- [12] 陈润, 张文辉. 包膜型缓控释肥料的研究综述 [J]. 化学工程与装备, 2010, 10 (2): 126-128.
- [13] Guo Mingyu, Zhan Dongping, Wu Lan. Preparation and Properties of a SlowRelease Membrane-Encapsulated Urea Fertilizer with Superabsorbent and Moisture Preservation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44 (12): 4206-4211.
- [14] 孙叶笛, 孙啸天, 魏亚, 等. 包膜缓释肥料养分释放特性评价及快速测定方法研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43 (1): 128-133.