

# Research on Nanotechnology Applied to Cadmium Treatment and Increase Production of Agriculture

Jianhua Gong<sup>1</sup>, Helun Xue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhuzhou Academy of Agricultural Sciences, Zhuzhou Hunan

<sup>2</sup>Chengdu Zhengguang Investment Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Email: gjh1267@126.com, 67600513@qq.com

Received: Jun. 12<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Nanotechnology has been widely applied to agricultural fields, but the control of cadmium pollution in agriculture and flower quality improvements are rarely reported. The aim of this study is to provide a new way and scientific basis for the application of nano cadmium-resistant agent (I-V). The results showed that the cadmium reduction rate of rice was 80% and that of rice was much lower than that of national standard under the condition of low cadmium soil (0.42 mg/kg). In the high cadmium soil background (2.549 mg/kg), the rate of cadmium reduction of type II to rice was 20.30%. The results showed that the soil cadmium content was 0.64 mg/kg, and the effect of type II 40 kg/667 m<sup>2</sup> was the best, reaching 20.74%. In the cadmium soil background (4.0 mg/kg), the effect of controlling cadmium of type II 160 kg/667 m<sup>2</sup> was the best, reaching 25.40%. In the soil cadmium content of 2.06 mg/kg, the effect of type IV and V to rice was more than 40%. When the soil cadmium content rose to 2.929 mg/kg, the effect of type IV and V were significantly reduced. The cadmium reduction rate of celery (cadmium background 0.8 mg/kg), eggplant (cadmium background 0.33 mg/kg), greenhouse pepper (1.2 mg/kg cadmium background) and open pepper (0.29 mg/kg cadmium background) were 38.13%, 28.07%, 30.29% and 50% respectively. The effect of reducing the amount of cadmium on the capsicum type II 80 kg/667 m<sup>2</sup> was significantly higher than that of 40 kg/667 m<sup>2</sup> and control (a = 0.05). In the soil cadmium background 1.49 mg/kg, III type of Zhejiang long radish reached cadmium reduction rate of 31.08%. Besides, type II and III had significant effect on rice production, and type I had obvious effect on lengthening lily flowering period. We proposed the "VPON" promotion model of nanotechnology cadmium treatment (V: Low cadmium variety; P: Soil pH value; O: Organic fertilizer; N: Nano-ecological cadmium-resistant agent).

## Keywords

Nanotechnology, Nano-Ecological Cadmium-Resistant Agent, Agriculture, Reduction of Cadmium, Increase Production, Extension of Flowering Period

---

# 纳米技术在农业镉治理及增产提质上的应用研究

龚建华<sup>1</sup>, 薛合伦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>株洲市农业科学研究所, 湖南 株洲

<sup>2</sup>成都正光投资集团有限公司, 四川 成都

Email: gjh1267@126.com, 67600513@qq.com

收稿日期: 2017年6月12日; 录用日期: 2017年6月23日; 发布日期: 2017年6月29日

## 摘要

纳米技术在农业领域已有诸多应用,但在农业镉治理及花卉提质增效方面鲜见报道。本研究旨在通过纳米生态阻镉剂(I型-V型)应用试验,为农产品镉治理提供新的途径和方法。研究表明,传统栽培方式下,在土壤镉背景0.42 mg/kg时,IV型对稻米的降镉率高达80%,稻米镉含量远低于国标;在土壤镉含量高达2.549 mg/kg时,II型对稻米的降镉率仍达到20.3%。在全生育期灌水的栽培方式下,土壤镉含量0.64 mg/kg时,II型40 kg/667 m<sup>2</sup>的降镉效果最好,达20.74%;在超高镉土壤背景4.0 mg/kg时,II型160 kg/667 m<sup>2</sup>的降镉效果最好,达25.40%;在土壤镉含量2.06 mg/kg时,IV型和V型对稻米的降镉效果均达到40%以上;在土壤镉含量上升到2.929 mg/kg时,IV型和V型对稻米的降镉效果明显降低。II型对芹菜(镉背景0.8 mg/kg)、茄子(镉背景0.33 mg/kg)、大棚辣椒(镉背景1.2 mg/kg)、露地辣椒(镉背景0.29 mg/kg)的降镉率分别达到38.13%、28.07%、30.29%、50%,其中大棚辣椒施用II型80 kg/667 m<sup>2</sup>的降镉效果显著高于40 kg/667 m<sup>2</sup>和对照( $\alpha = 0.05$ )。在土壤镉背景1.49 mg/kg时,III型对浙大长萝卜的降镉率达31.08%。II型和III型对水稻具有良好的增产作用,I型对百合花具有明显的延长花期效果。提出了纳米技术镉治理“VPON”推广模式(V:低镉品种;P:土壤pH值;O:有机肥;N:纳米生态阻镉剂)。

## 关键词

纳米技术, 农业, 镉治理, 增产, 延长花期

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

镉是一种对动物具有很强毒性的重金属,世界卫生组织将其确定为食品污染物,联合国环境规划署也将其列为12种具有全球性意义的危险化学物质中的第1位危险物质,由此可见镉污染在全球范围内的影响和重视[1][2][3][4]。我国目前受镉、铅、铬等重金属污染的耕地面积将近2000万hm<sup>2</sup>,约占总耕地面积的20%,平均每年被重金属污染的粮食达1200万t[5];其中,镉污染面积28万hm<sup>2</sup>,年产镉超标农产品超过150万t[6]。湖南是有色金属之乡,是我国重要的双季稻主产区,重金属污染面积较大,

其中镉污染面积 2.8 万  $\text{hm}^2$ , 占全省总耕地面积的 13%, 治理工作任重道远。2014~2016 年, 国家在湖南启动了镉污染土壤的治理研究试点, 研究集成和推广“VIP+N”技术模式(V: 低镉品种; I: 水分管理; P: 土壤 PH 值; N: 阻镉剂、钝化剂等土壤调理剂和叶面阻镉剂等), 取得了良好的治理效果。本研究采用的纳米生态阻镉剂, 就是土壤调理剂“N”中的一种。

纳米技术是现代前沿科技, 于 20 世纪 80 年代末 90 年代初诞生。21 世纪以来, 世界各国为改善土壤与水环境、提高农作物产量、改善品质, 加快了纳米技术在农业领域中的研究和应用。2002 年 6 月, 中国材料科学之父师昌绪院士预测: 纳米技术与生物技术相结合, 一旦找到突破口, 对于解决粮食危机、能源危机、环境危机都具有重大意义。2003 年 9 月, 美国发布了农业发展路线图, 提出要重视纳米技术在农业和食品工业中的应用, 并预言纳米技术将在 21 世纪使整个农业生产方式发生革命性的改变。俄、日、德等主要工业国家都作了大量研究, 我国在 21 世纪初就将纳米肥料的研究纳入“国家若干战略性新兴产业的发展研究”、“国家 863 计划”、“国家科技攻关计划”等重大专项。目前, 纳米技术已广泛应用于家电、轻工、电子行业、纺织、电力、建材等方面[7], 在农业上已用于植物种子处理、纳米生物农药、植物叶面肥、瓜果蔬菜保鲜、水培植物营养液消毒杀菌、植物非试管快繁、改良盐碱地、沙化治理、节水工程等领域[8]。成都正光投资集团有限公司在师昌绪院士的指导下, 运用纳米技术与生物技术、肥料技术相结合, 获多项国家发明专利, 其纳米土壤材料在沙化治理和节水农业中正在发挥重要作用。正光纳米材料主要由纳米材料、分散体系及其他营养成分构成, 具有水肥缓释、改良土壤、速效与长效兼备等特点, 对多种农作物具有增产增收作用。2015 年, 成都正光投资集团有限公司面向纳米重金属治理领域, 成立了成都纳诺环保科技有限公司, 屹今已研发出纳米生态阻镉剂 I 型、II 型、III 型、IV 型和 V 型等高科技镉治理产品。

为探索纳米技术在农田土壤重金属污染治理及花卉等经济作物提质增效上的应用, 2015~2016 年, 株洲市农业科学研究所与成都纳诺环保科技有限公司合作开展了协同攻关, 先后在湖南攸县、株洲县、天元区、芦淞区、衡山县等地对纳米生态阻镉剂进行了多项试验, 其中 II 型、III 型、IV 型和 V 型是第一时间在本试验中开展应用研究。现将试验汇总分析如下, 供同行研究参考。

## 2. 材料与方 法

### 2.1. 试验材料

本试验纳米材料由成都纳诺环保科技有限公司研发生产和提供。由于纳米生态阻镉剂的研发过程是根据试验效果在不断调整和升级技术配方, 因此, 2015 年之前在水稻、花生、烟草等作物上试验的都是纳米生物肥(后称为 I 型)。2015 年正式定名为纳米生态阻镉剂, 并推出了 II 型和 III 型(第二代产品); 2016 年研发出 IV 型、V 型(第三代产品)。

### 2.2. 试验对象

试验作物有水稻、黄瓜、辣椒、茄子、豆角、芹菜、萝卜、饲料桑、百合花等。试验土壤镉背景值从 0.29  $\text{mg}/\text{kg}$  到 4.0  $\text{mg}/\text{kg}$ , 以中高度镉污染土壤为主要研究对象。试验土壤均为弱酸性, pH 值 6 左右。

### 2.3. 试验方法

试验土壤镉背景值、灌溉水、稻米等试验产品的镉含量检测, 由通过湖南省镉治理招标的专业检测公司完成。试验设计有随机区组试验、对比试验、盆栽试验和生产试验(详见表 1)。分析方法主要采用对比分析法。

**Table 1.** A list of experimental design of nano cadmium-resistant agent in 2015-2016  
**表 1.** 2015~2016 年纳米生态阻镉剂试验设计一览表

年度	作物	试验设计及方法
2015 年	黄瓜	供试品种为津优 48 号、蔬研白绿、津优 35 号, 品种间随机区组设计, 三次重复。小区长 8 m、宽 1.3 m (包沟), 每小区栽两行, 每行 16 株, 共 32 株。纳米生态阻镉剂(II 型)的降镉效果采用对比法设计, 即每小区一行施纳米生态阻镉剂, 另一行不施作对照。纳米生态阻镉剂用量为 40 kg/667 <sup>2</sup> , 沟施。试验田土壤镉背景值 2.12 mg/kg。取样部位为第 7~8 节。
2015 年	大棚茄子	随机区组试验, 二次重复。供试品种为紫长茄。钢架塑料大棚两个, 面积 360 m <sup>2</sup> 。处理设置: A (纳米生态阻镉剂 I 型 40 kg/667 m <sup>2</sup> +喷施纳米生态阻镉液三次)、B (纳米生态阻镉剂 I 型 80 kg/m <sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次)、CK (不施纳米生态阻镉剂 I 型)。每大棚分为三畦, 每畦为一个小区。试验田土壤镉背景值 1.4 mg/kg。取样部位为“对茄”。
2015 年	露地茄子	对比试验。供试品种为油灌茄。试验面积 667 m <sup>2</sup> , 采用地膜覆盖。处理设置: A (纳米生态阻镉剂 II 型 40 kg/667 m <sup>2</sup> +喷施纳米生态阻镉液三次), CK (不施纳米生态阻镉剂 II 型)。试验田土壤镉背景值 0.33 mg/kg。取样部位为“对茄”。
2015 年	大棚辣椒	随机区组试验, 三次重复。供试品种: 株椒二号, 长辣 8 号。试验在钢架塑料大棚内进行, 面积 180 m <sup>2</sup> , 共 18 个小区, 每小区栽 30 株。处理设置: L1-A (株椒二号 + 纳米生态阻镉剂 II 型 40 kg/667m <sup>2</sup> )、L1-B (株椒二号 + 纳米生态阻镉剂 II 型 80 kg/667 m <sup>2</sup> )、L1-CK (株椒二号 + 不施纳米生态阻镉剂 II 型)、L2-A (长辣 8 号 + 纳米生态阻镉剂 II 型 40 kg/667 m <sup>2</sup> )、L2-B (长辣 8 号 + 纳米生态阻镉剂 II 型 80 kg/667 m <sup>2</sup> )、L2-CK (长辣 8 号 + 不施纳米生态阻镉剂 II 型)。土壤镉背景值 1.2 mg/kg。取样部位为“八面风”商品椒。
2015 年	露地辣椒	供试品种为长辣 7 号、长研 201 号, 品种间随机区组设计, 三次重复。小区长 8 m、宽 1.3 m(包沟), 每小区栽两行, 每行 16 株, 共 32 株。纳米生态阻镉剂(II 型)的降镉效果采用对比法设计, 即每小区一行施纳米生态阻镉剂, 另一行不施作对照。纳米生态阻镉剂用量为 40 kg/667m <sup>2</sup> , 沟施。土壤镉背景值 1.49 mg/kg。取样部位为“八面风”商品椒。
2015 年	露地辣椒	对比试验。供试品种为王者(江西)。试验面积 2668 m <sup>2</sup> , 采用地膜覆盖。处理设置: A (纳米生态阻镉剂 I 型 40 kg/667m <sup>2</sup> +喷施纳米生态阻镉液三次), CK1 (不施纳米生态阻镉剂 I 型), 面积 2000 m <sup>2</sup> ; B (纳米生态阻镉剂 II 型 40 kg/667m <sup>2</sup> +喷施纳米生态阻镉液三次), CK2 (不施纳米生态阻镉剂 II 型为对照), 面积 667 m <sup>2</sup> 。试验田土壤镉背景值 0.29 mg/kg。取样部位为“四母斗”商品椒。
2015 年	萝卜	供试品种为南畔洲、浙大长, 品种间随机区组设计, 三次重复。小区长 6 m, 宽 3.2 m(包沟), 共 6 个小区。纳米生态阻镉剂III型的降镉效果采用对比法设计, 即每小区栽 4 行, 其中两行施纳米生态阻镉剂, 另两行不施作对照。处理设置: A (南畔洲 + 纳米生态阻镉剂III型 80 kg/667m <sup>2</sup> )、B (浙大长 + 纳米生态阻镉剂III型 80 kg/667 m <sup>2</sup> )、CK1 (南畔洲 + 不施纳米生态阻镉剂)、CK2 (浙大长 + 不施纳米生态阻镉剂)。纳米生态阻镉剂采用穴施(每穴 25 g)。土壤镉背景 1.49 mg/kg。取样部位为萝卜产品。
2015 年	大棚芹菜	随机区组试验。处理设置: A (纳米生态阻镉剂 I 型 80 kg/667 m <sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次)、B (纳米生态阻镉剂 II 型 80 kg/667 m <sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次)、C (纳米生态阻镉剂III型 80 kg/667 m <sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次)、CK (不施纳米生态阻镉剂作对照)。两次重复。纳米生态阻镉剂一次性作基肥施入。试验在大棚中进行, 小区做成高畦, 长 2 m, 宽 0.5 m, 芹菜苗高 5 cm 左右时移栽, 每个小区栽 10 株, 单行。移栽后 45 天取芹菜茎测定镉含量。土壤镉背景 0.8 mg/kg。取样部位为茎。
2015 年	饲料桑	对比试验, 试验面积 2000 m <sup>2</sup> 。处理设置: A (纳米生态阻镉剂 I 型 40 kg/667 m <sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次), CK (不施纳米生态阻镉剂作对照)。施用方法为沟施(追肥)。土壤镉背景 1.7 mg/kg。取样部位为中上部叶片。
2015 年	早稻	盆栽试验。试验设纳米生态阻镉剂 II 型 20 kg/667 m <sup>2</sup> (A)、40 kg/667 m <sup>2</sup> (B)、80 kg/667 m <sup>2</sup> (C)、160 kg/667 m <sup>2</sup> (D)、320 kg/667 m <sup>2</sup> (E)等五个处理, 以不施纳米生态阻镉剂为对照。三次重复。灌溉水为井水, 镉含量为 0.00028 mg/kg。全生育期淹水 1~4 cm。供试品种为 DK728(杂交稻)。土壤镉背景 0.64 mg/kg。测量产量和稻米镉含量。
2015 年	中稻	盆栽试验。试验设纳米生态阻镉剂 II 型 20 kg/667 m <sup>2</sup> (A)、40 kg/667 m <sup>2</sup> (B)、80 kg/667 m <sup>2</sup> (C)、160 kg/667 m <sup>2</sup> (D)、320 kg/667 m <sup>2</sup> (E)等五个处理, 以不施纳米生态阻镉剂为对照。三次重复。灌溉水为井水, 镉含量为 0.00028 mg/kg。全生育期淹水 1~4 cm。供试品种为 D40(杂交稻)。土壤镉背景 4.0 mg/kg。测量产量和稻米镉含量。
2015 年	晚稻	盆栽试验。试验设纳米生态阻镉剂III型 20 kg/667 m <sup>2</sup> (A)、40 kg/667 m <sup>2</sup> (B)、80 kg/667 m <sup>2</sup> (C)、160 kg/667 m <sup>2</sup> (D)、320 kg/667 m <sup>2</sup> (E)等五个处理, 以不施纳米生态阻镉剂为对照, 三次重复。灌溉水为井水, 镉含量为 0.00028 mg/kg。全生育期淹水 1~4 cm。供试品种为优香一号优质稻。土壤镉背景 4.0 mg/kg。测量产量和稻米镉含量。

Continued

2015年	晚稻	对比试验。试验田土壤镉背景值 2.549 mg/kg。供试品种为优香一号优质稻。试验设纳米生态阻镉剂 III型 40 kg/667 m <sup>2</sup> (A)、II型 40 kg/667 m <sup>2</sup> (B), 以不施纳米生态阻镉剂为对照(CK)。小区面积 20 m <sup>2</sup> , 小区间用塑料膜完全分隔。在施用纳米生态阻镉剂作基肥的基础上, 其它管理同当地水稻大田生产。
2015年	晚稻	随机区组试验。试验设纳米生态阻镉剂III型 20 kg/667 m <sup>2</sup> (A)、40 kg/667 m <sup>2</sup> (B)、80 kg/667 m <sup>2</sup> (C)、160 kg/667 m <sup>2</sup> (D)、320 kg/667 m <sup>2</sup> (E)等五个处理, 以不施纳米生态阻镉剂为对照, 两次重复。小区面积 24 m <sup>2</sup> (不包沟), 小区间用塑料膜完全分隔。在施用纳米生态阻镉剂作基肥的基础上, 其它管理同当地水稻大田生产。供试品种为 P222。土壤镉背景 4.0 mg/kg。测量稻米镉含量。
2016年	中稻	盆栽试验。试验设纳米生态阻镉剂IV型 (A)、纳米生态阻镉剂V型 (B)和对照 (CK)三个处理, 纳米生态阻镉剂用量为 12 g/盆(约 80 kg/667 m <sup>2</sup> ), 重复三次。灌溉水为井水, 镉含量为 0.00028 mg/kg。全生育期淹水 1~4 cm。土壤为高镉背景(全镉含量 2.929 mg/kg, 有效镉含量 1.756 mg/kg)。测量稻米镉含量。
2016年	晚稻	盆栽试验。试验设纳米生态阻镉剂IV型 (A)、纳米生态阻镉剂V型 (B)和对照 (CK)三个处理, 纳米生态阻镉剂用量为 12 g/盆(约 80 kg/667 m <sup>2</sup> ), 重复三次。灌溉水为井水, 全生育期淹水 1~4 cm。试验土壤为高镉背景(全镉含量 2.06 mg/kg, 有效镉含量 1.10 mg/kg)。测量稻米镉含量。
2016年	晚稻	生产试验。验证纳米生态阻镉剂IV型在轻度污染稻田的应用效果, 面积 1333 m <sup>2</sup> , 施用量 50 kg/667 m <sup>2</sup> 。土壤镉背景值 0.42 mg/kg。测量稻米镉含量。
2016年	百合花	生产试验。试验作物为香水百合, 试验面积 1.333 hm <sup>2</sup> 。每 667 m <sup>2</sup> 施用纳米生态阻镉剂 I 型(纳米生物肥) 50 kg。试验目的是验证纳米生态阻镉剂 I 型在百合花大田生产上的提质增效作用。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 纳米生态阻镉剂对蔬菜具有良好的降镉作用

##### 3.1.1. 在黄瓜上的应用效果

试验表明, 在高镉土壤背景(2.12 mg/kg)条件下, 黄瓜施用纳米生态阻镉剂 II 型 40 kg/667 m<sup>2</sup>, 对津优 35 号、津优 48 号、蔬研白绿的降镉效果分别为 15.38%、12.50%、10.53%。对各品种未施纳米生态阻镉剂 II 型的镉含量数据进行方差分析, 各品种间的镉含量差异达显著水平(F = 8.14, F<sub>0.05</sub> = 6.94), 重复间无显著差异(F = 1.65, F<sub>0.05</sub> = 6.94)。从表 2 可以看出, 18 个黄瓜样本镉含量均低于 0.05 mg/kg 的国家标准, 说明黄瓜属低镉吸收积累的蔬菜, 可以作为镉污染区结构调整作物。

##### 3.1.2. 在茄子上的应用效果

在土壤镉背景值 1.4 mg/kg 的高镉条件下, 处理 B 大棚茄子果实的镉含量较对照降低 26.07% (详见表 3), 而处理 A 却高于对照 6.67%。方差分析表明, 处理间镉含量的差异不显著(F = 3.2239, F<sub>0.05</sub> = 19)。在土壤镉背景值 0.33 mg/kg 的低镉条件下, 露地茄子施用纳米生态阻镉剂(II 型) 40 kg/667 m<sup>2</sup> + 喷施纳米生态阻镉液三次, 果实的降镉效果达到 28.07% (详见表 4)。但无论是大棚栽培还是露地栽培、是高镉土壤还是低镉土壤, 茄子果实的镉含量均高于 0.05 mg/kg 的国家标准, 说明茄子属高镉吸收积累的蔬菜, 生产上应在采取更有效的降镉措施。

##### 3.1.3. 在辣椒上的应用效果

方差分析表明, 在土壤镉背景值 1.2 mg/kg 和大棚栽培条件下, 辣椒施用纳米生态阻镉剂 II 型各处理间镉含量的差异达显著水平(F = 7.71, F<sub>0.05</sub> = 7.56)。其中, 长辣 8 号施用 II 型 80 kg/667 m<sup>2</sup> (L2-B)的果实镉含量最低, 较对照(L2-CK)的镉含量降低 30.29%; 株椒二号施用 II 型 80 kg/667 m<sup>2</sup> (L1-B)的果实镉含量次之, 较对照(L1-CK)的镉含量降低 17.1%; 而施用 II 型 40 kg/667 m<sup>2</sup> 的降镉效果不理想。说明纳米生态阻镉剂 II 型用量的增加, 明显有利于提高辣椒的降镉效果(详见表 5)。

在土壤镉背景值 1.249 mg/kg 和露地栽培条件下, 辣椒施用纳米生态阻镉剂(II 型) 40 kg/667 m<sup>2</sup>, 长辣 7 号的降镉率为 9.80%, 长研 201 号的降镉率仅为 3.58% (详见表 6)。对各品种未施纳米生态阻镉剂 II 型

**Table 2.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type II) to cucumber**表 2.** 纳米生态阻镉剂(II 型)对黄瓜降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	III (mg/kg)	平均(mg/kg)	比对照±%
津优 48 号处理	0.014	0.016	0.014	0.014	-12.50
津优 48 号对照	0.017	0.017	0.015	0.016	
蔬研白绿处理	0.018	0.014	0.018	0.017	-10.53
蔬研白绿对照	0.020	0.021	0.017	0.019	
津优 35 号处理	0.013	0.01	0.009	0.011	-15.38
津优 35 号对照	0.016	0.01	0.012	0.013	
平均	0.016	0.015	0.014		

**Table 3.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type I) to eggplant in greenhouse**表 3.** 纳米生态阻镉剂(I 型)对大棚茄子降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	平均(mg/kg)	比对照±%
A	0.394	0.326	0.360	6.67
B	0.229	0.270	0.250	-26.07
CK	0.375	0.300	0.338	
平均	0.332	0.299		

**Table 4.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type II) to eggplant**表 4.** 纳米生态阻镉剂(II 型)对茄子降镉效果分析表

处理	镉含量(mg/kg)	比对照±%
A	0.082	-28.07
CK	0.114	
平均	0.098	

**Table 5.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type II) to pepper in high-cadmium greenhouse**表 5.** 纳米生态阻镉剂(II 型)对高镉背景大棚辣椒降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	III (mg/kg)	平均(mg/kg)	比对照±%
L1-A	0.076	0.111	0.125	0.104	-6.02
L1-B	0.073	0.116	0.086	0.092	-17.1
L1-CK	0.086	0.121	0.125	0.111	
平均	0.078	0.116	0.112	0.102	
L2-A	0.118	0.109	0.146	0.124	-1.59
L2-B	0.076	0.092	0.097	0.088	-30.29
L2-CK	0.116	0.128	0.135	0.126	
平均	0.103	0.110	0.126	0.113	

**Table 6.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type II) to pepper with high cadmium background**表 6.** 纳米生态阻镉剂(II 型)对高镉背景露地辣椒降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	III (mg/kg)	平均(mg/kg)	比对照±%
长辣 7 号处理	0.0836	0.0858	0.0653	0.0782	-9.80
长辣 7 号对照	0.0834	0.0900	0.0867	0.0867	
平均	0.0835	0.0879	0.076	0.0825	
长研 201 号处理	0.0753	0.0824	0.0848	0.0808	-3.58
长研 201 号对照	0.0804	0.0892	0.0818	0.0838	
平均	0.0779	0.0858	0.0833	0.0823	

的镉含量数据进行方差分析, 表明品种间的镉含量无显著差异( $F = 5.992$ ,  $F_{0.05} = 18.513$ ), 重复间无显著差异( $F = 14.795$ ,  $F_{0.05} = 19$ )。

在土壤镉背景值  $0.29 \text{ mg/kg}$  的条件下(国家 III 级土壤标准的镉含量为  $0.3 \text{ mg/kg}$ ), 施用纳米生态阻镉剂 II 型  $40 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  + 喷施纳米生态阻镉液三次(B), 降镉效果高达 50% (详见表 8); 施用纳米生态阻镉剂 I 型  $40 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  + 喷施纳米生态阻镉液三次(A), 降镉效果仅为 12% (详见表 7)。说明在低镉土壤条件下, 每  $667 \text{ m}^2$  施纳米生态阻镉剂  $40 \text{ kg}$  时, II 型的降镉效果显著高于 I 型。

从表 5 和表 6 可以看出, 在高镉土壤背景下, 无论是大棚试验还是露地试验, 辣椒果实的镉含量均高于  $0.05 \text{ mg/kg}$  的国家标准, 其中: 大棚辣椒株椒二号平均超标 104.22%, 大棚辣椒长辣 8 号平均超标 126.00%, 露地辣椒长辣 7 号平均超标 65.00%, 露地辣椒长研 201 号平均超标 64.60%。究其原因, 一方面, 大棚小气候条件下可能更有利于辣椒对镉的吸收, 这一结果与大棚茄子试验的镉含量超标情况完全一致; 另一方面, 辣椒的吸镉能力较强, 生产上应在采取更有效的降镉措施。从表 7、表 8 可以看出, 当土壤镉含量达到国家土壤 III 级标准时, 辣椒的镉含量低于国家标准。

### 3.1.4. 在芹菜上的应用效果

芹菜(茎)镉含量检测结果详见表 9。在土壤镉背景值  $0.8 \text{ mg/kg}$  和大棚栽培条件下, 处理 B (纳米生态阻镉剂 II 型  $80 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  + 喷施纳米生态阻镉液三次)较 CK (对照)的镉含量降低 38.13%, 而处理 A (纳米生态阻镉剂 I 型  $80 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  + 喷施纳米生态阻镉液三次)和处理 C (纳米生态阻镉剂 III 型  $80 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  + 喷施纳米生态阻镉液三次)的镉含量均高于对照。说明 II 型对芹菜具有较好的降镉效果, 但各处理间镉含量的差异尚未达到显著水平( $F = 5.7676$ ,  $F_{0.05} = 9.2766$ ), 而 I 型和 III 型不适于芹菜。

从表 9 可以看出, 在中等土壤镉含量情况下, 大棚芹菜处理和对照的镉含量均大大高于  $0.05 \text{ mg/kg}$  的国家标准, 说明芹菜是高镉吸收积累作物, 不宜于在镉污染土壤生产。

### 3.1.5. 在萝卜上的应用效果

试验表明, 在高镉土壤背景( $1.49 \text{ mg/kg}$ )条件下, 萝卜施用纳米生态阻镉剂 III 型  $80 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  的降镉效果明显, 其中: 浙大长品种的处理(B)较对照(CK2)镉含量降低 31.08%, 南畔洲品种的处理(A)较对照(CK1)降低 17.30% (详见表 10)。对各品种未施纳米生态阻镉剂 III 型的镉含量数据进行方差分析, 表明萝卜品种间的镉含量无显著差异( $F = 1.231$ ,  $F_{0.05} = 18.513$ )。

## 3.2. 纳米生态阻镉剂对水稻具有明显的降镉作用

### 3.2.1. 盆栽试验结果与分析

盆栽试验是在全生育期淹水(1~4 cm)条件下进行的。2015 的试验表明, 施用纳米生态阻镉剂 II 型, 在低镉土壤背景  $0.64 \text{ mg/kg}$  时(早稻), 对稻米的平均降镉率为 15%, 其中  $40 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  的降镉效果最好, 达 20.74% (详见表 11); 而在超高镉土壤背景  $4.0 \text{ mg/kg}$  条件下(中稻), 对稻米的平均降镉率仍然达到 18%, 其中  $160 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$  的降镉效果最好, 达 25.40% (详见表 12)。施用纳米生态阻镉剂 III 型  $20\sim 320 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$ , 在超高镉土壤背景( $4.0 \text{ mg/kg}$ )条件下(晚稻), 稻米的镉含量均高于对照, 说明 III 型在水田土壤超高镉背景下, 反而促进了水稻对镉的吸收(详见表 13)。由于纳米生态阻镉剂主要由纳米材料、分散体系及其他营养成分构成, 而 II 型的纳米材料所占比例高于 III 型(在纳米产品设计时确定的), 因此其降镉效果明显优于 III 型, 这与旱地芹菜的试验结果完全一致。

2016 的试验表明, 纳米生态阻镉剂第三代产品 IV 型(A)和 V 型(B), 在土壤镉含量  $2.06 \text{ mg/kg}$  情况下(晚稻), 对稻米的降镉效果均达到 40% 以上(详见表 14), 阻镉效果十分明显。在土壤镉含量提高到  $2.929 \text{ mg/kg}$  时(中稻), 降镉效果明显下降, 但 IV 型优于 V 型(IV 型的纳米材料所占比例高于 V 型), 详见表 15。

**Table 7.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type I) to pepper in low-cadmium soil**表 7.** 纳米生态阻镉剂 I 型对低镉土壤露地辣椒降镉效果分析表

处理	辣椒镉含量(mg/kg)	比对照±%
A	0.022	-12
CK1	0.025	
平均	0.024	

**Table 8.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type II) to pepper in low-cadmium soil**表 8.** 纳米生态阻镉剂 II 型对低镉土壤露地辣椒降镉效果分析表

处理	辣椒镉含量(mg/kg)	比对照±%
B	0.021	-50
CK2	0.042	
平均	0.032	

**Table 9.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent type I, II, III to greenhouse celery in low-cadmium soil**表 9.** 纳米生态阻镉剂 I、II、III 型对大棚芹菜的降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	平均(mg/kg)	较对照±%
A	0.170	0.200	0.185	15.63
B	0.097	0.100	0.099	-38.13
C	0.140	0.220	0.180	12.50
CK	0.150	0.170	0.160	
平均	0.139	0.173		

**Table 10.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant agent (type III) to radish in low-cadmium soil**表 10.** 纳米生态阻镉剂 III 型对萝卜的降镉效果分析表

处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	III (mg/kg)	平均(mg/kg)	比对照±%
A	0.085	0.079	0.075	0.080	-17.30
CK1	0.117	0.094	0.078	0.096	
平均	0.101	0.087	0.077	0.088	
B	0.073	0.064	0.118	0.085	-31.08
CK2	0.104	0.117	0.149	0.123	
平均	0.089	0.091	0.134	0.104	

**Table 11.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type II to potted early rice (2015)**表 11.** 纳米生态阻镉剂 II 型早稻盆栽试验降镉效果分析表(2015 年)

处理	稻米镉含量平均值(mg/kg)	较对照±%
A	0.1305	-2.97
B	0.1066	-20.74
C	0.1087	-19.18
D	0.1161	-13.68
E	0.1098	-18.36
CK	0.1345	



**Table 12.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type II to potted medium rice (2015)

**表 12.** 纳米生态阻镉剂 II 型中稻盆栽试验降镉效果分析表(2015 年)

处理	稻米镉含量平均值(mg/kg)	较对照±%
A	0.240	-22.33
B	0.272	-11.97
C	0.262	-15.37
D	0.231	-25.40
E	0.262	-15.37
CK	0.309	
平均	0.263	

**Table 13.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type III to potted late rice (2015)

**表 13.** 纳米生态阻镉剂 III 型晚稻盆栽试验降镉效果分析表(2015 年)

处理	稻米镉含量平均值(mg/kg)	较对照±%
A	0.297	36.5
B	0.409	88.34
C	0.394	81.44
D	0.423	94.79
E	0.362	66.72
CK	0.217	

**Table 14.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type IV and V to potted late rice (2016)

**表 14.** 纳米生态阻镉剂 IV、V 型晚稻盆栽试验降镉效果分析表(2016 年)

处理	稻米镉含量平均值(mg/kg)	较对照±%
A	0.1193	-40.14
B	0.1187	-40.44
CK	0.1993	

**Table 15.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type IV and V to potted medium rice (2016)

**表 15.** 纳米生态阻镉剂 IV、V 型中稻盆栽试验降镉效果分析表(2016 年)

处理	稻米镉含量平均值(mg/kg)	较对照±%
A	0.141	-14.47
B	0.153	-7.26
CK	0.165	

### 3.2.2. 大田试验结果与分析

在传统栽培方式下, 我们设计了超高镉土壤背景下的随机区组试验、高镉土壤背景下的田间对比试验、低镉土壤背景下的生产试验。结果表明: 1) 在高镉土壤背景条件下(2.549 mg/kg), 纳米生态阻镉剂 III 型、II 型对稻米降镉率分别为 9.1%、20.30%, II 型优于 III 型(详见表 16)。2) 在轻度镉污染土壤(0.42 mg/kg)条件下, 纳米生态阻镉剂 IV 型(施用量 50 kg/667 m<sup>2</sup>)具有非常显著的降镉效果, 田间现场取样快速检测的降镉率为 73.79%; 湖南省农科院稻米检测中心室内检测的降镉率达 80.28%。样品完全自然干燥后, 株洲市农业科学研究所实验室对备份样品再次进行了检测, 处理的镉含量为 0.065 mg/kg (对照因缺备份样品而未作对比检测)(详见表 17)。说明在大田生产中, IV 型可有效解决轻度镉超标土壤的镉稻米问题。

**Table 16.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type II and III to late rice field (2015)**表 16.** 纳米生态阻镉剂 II、III 型晚稻大田对比试验降镉效果分析表(2015 年)

处理	稻米镉含量(mg/kg)	较对照±%
A	1.688	-9.1
B	1.480	-20.3
CK	1.857	
平均	1.675	

**Table 17.** Analysis of effect on nano cadmium-resistant type IV to late rice field (2016)**表 17.** 纳米生态阻镉剂 IV 型晚稻生产试验降镉效果分析表(2016 年)

检测方式	稻米镉含量(mg/kg)	较对照±%
现场快速检测	处理	0.108
	对照	0.412
湖南农科院稻米检测中心	处理	0.084
	对照	0.426
株洲市农业科学研究所	处理	0.065
	对照	缺(采用对照平均值)
	对照平均值	0.419

3) 在超高镉土壤背景(4.0 mg/kg)下, 施用纳米生态阻镉剂 III 型的稻米镉含量, 除处理 E 接近对照外, 其它都高于对照(详见表 18), 这与盆栽试验结论一致。

### 3.3. 纳米生态阻镉剂对水稻增产作用显著

#### 3.3.1. 增产效果分析

以施用纳米生态阻镉剂作基肥(早稻和中稻为 II 型、晚稻为 III 型), 设置 A (20 kg/667 m<sup>2</sup>)、B (40 kg/667 m<sup>2</sup>)、C (80 kg/667 m<sup>2</sup>)、D (160 kg/667 m<sup>2</sup>)、E (320 kg/667 m<sup>2</sup>)等 5 个处理, 以不施用纳米生态阻镉剂作对照。结果表明, 早、中、晚稻平均增产效果呈现随着纳米生态阻镉剂用量增加而增长的趋势(详见图 1), 但早稻和晚稻均具有拐点, 且早稻较晚稻的拐点延后, 这可能与早、晚稻生长期的温度变化特点有关。早稻以每 667 m<sup>2</sup> 施 160 kg 的产量最高, 增产率达 25.98% (详见表 19)。晚稻以每 667 m<sup>2</sup> 施 80 kg 的产量最高, 增产率达 27.05% (详见表 20)。中稻可能是由于品种的生长期较长, 以及纳米生态阻镉剂的缓释性特点, 以致纳米生态阻镉剂发挥作用的时间较长, 从而用量越大增产效果越好, 每 667 m<sup>2</sup> 施 320 kg 的增产达 32.86% (详见表 21)。

#### 3.3.2. 投入产出比分析

鉴于目前纳米生态阻镉剂的成本较高, 因此最佳投入产出比分析对实际生产应用具有指导意义, 从图 2 可以看出, 每 667 m<sup>2</sup> 施纳米生态阻镉剂 40 kg 时, 每千克对增产的贡献率最高, 达 0.21%; 其次是每 667 m<sup>2</sup> 施 80 kg, 每千克对增产的贡献率为 0.18%。因此, 纳米生态阻镉剂对水稻增产效果而言, 以 40 kg/667 m<sup>2</sup> 为宜。

### 3.4. 纳米生态阻镉剂对经济作物具有提质增效作用

#### 3.4.1. 在百合花上的应用效果

龚建华等研究发现, 百合花每 667 m<sup>2</sup> 施用纳米生态阻镉剂 I 型(原纳米生物肥) 40 千克作基肥, 并在生长期喷施“纳米液态肥 + 美绿地叶面肥” 三次, 能显著增强百合花的生长势, 茎粗提高了 28.37%,

**Table 18.** Analysis on nano cadmium-resistant type III to random late rice zone  
**表 18.** 纳米生态阻镉剂 III 型晚稻随机区组试验稻米镉含量检测结果及分析表

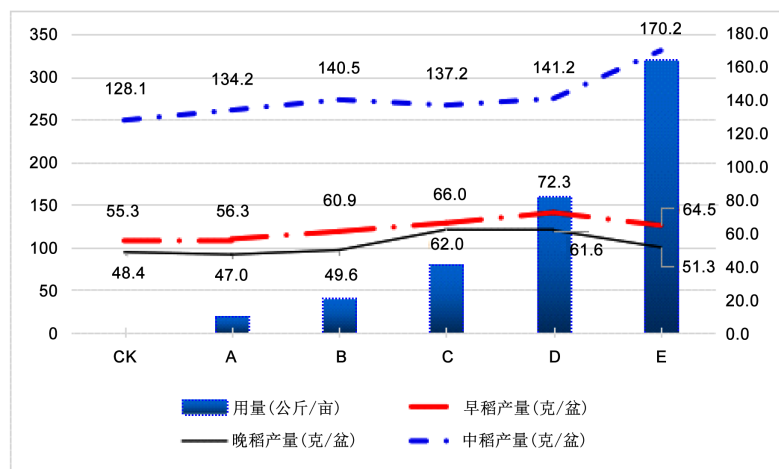
处理	I (mg/kg)	II (mg/kg)	平均(mg/kg)	较对照±%
A	0.870	1.196	1.033	12.10
B	0.933	1.079	1.006	9.17
C	1.120	1.002	1.061	15.14
D	1.072	1.316	1.194	29.57
E	0.944	0.858	0.901	-2.22
CK	0.913	0.930	0.922	
平均	0.975	1.064	1.019	

**Table 19.** Analysis of the effect on nano cadmium-resistant agent type II to early rice yield  
**表 19.** 纳米生态阻镉剂 II 型对早稻产量影响分析表

处理	平均产量(g/盆)	比对照±%
A	56.3	1.81
B	60.9	10.19
C	66.0	19.41
D	69.7	25.98
E	64.5	16.64
CK	55.3	

**Table 20.** Analysis of the effect on nano cadmium-resistant agent type III to late rice yield  
**表 20.** 纳米生态阻镉剂 III 型对晚稻产量影响分析表

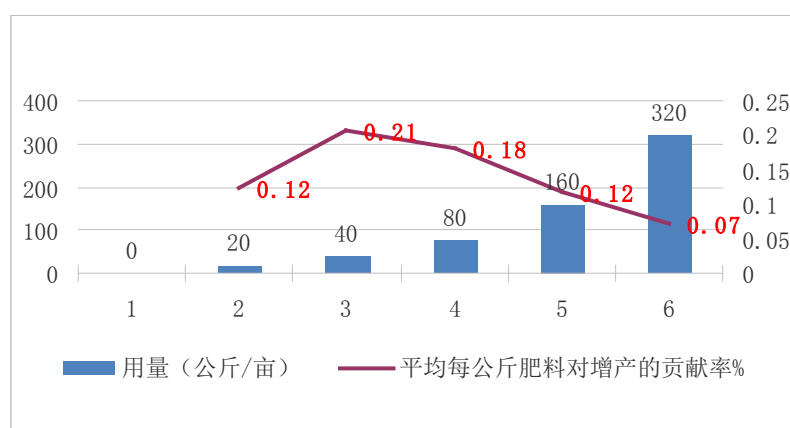
处理	平均产量(g/盆)	比对照±%
A	47.0	-3.69
B	49.6	1.71
C	62.0	27.05
D	61.6	26.16
E	51.3	5.19
CK	48.8	



**Figure 1.** The effect of nano cadmium-resistant agent (type II, III) to rice  
**图 1.** 纳米生态阻镉剂(II 型、III 型)对水稻产量的影响

**Table 21.** Analysis of the effect on nano cadmium-resistant agent type II to medium rice yield  
**表 21.** 纳米生态阻镉剂 II 型对中稻产量影响分析表

处理	平均产量(g/盆)	比对照±%
A	134.2	4.79
B	140.5	9.71
C	137.2	7.08
D	141.2	10.20
E	170.2	32.86
CK	128.1	



**Figure 2.** The contribution rate of nano cadmium-resistant agent (kg) to rice  
**图 2.** 纳米生态阻镉剂单位重量(千克)对水稻增产的贡献率

叶绿素含量明显增加, 延长百合花期 5~8 天, 花可朵直径增长 9% 以上, 大大提高了百合花的观赏价值与经济价值[9]。2016 年, 我们对此进行了大田生产验证, 试验地点为株洲市天元区新塘社区, 生产示范面积 1.33 hm<sup>2</sup>, 百合品种为黄天霸(进口)。结果表明, 施用纳米生态阻镉剂 I 型 40 千克/667 m<sup>2</sup>, 百合花期延长 5 天左右。说明纳米生态阻镉剂 I 型在湖南春季和初夏多雨的环境下, 对延长百合花期和提质增效的作用明显且效果稳定。

### 3.4.2. 在饲料桑上的应用效果

饲料桑(又称蛋白桑)的主要产品为桑叶, 其蛋白质含量高, 主要用作青贮饲料。因此, 饲料桑作为湖南重金属土壤结构调整作物, 降低桑叶的重金属含量是提高品质的一个重要方面。试验表明, 在土壤高镉背景(1.7 mg/kg)条件下, 饲料桑叶片的镉含量处理(A)较对照(CK)降低 6.29%, 效果不太明显。这可能与纳米生态阻镉剂采用追肥方式(沟施), 且从施肥到取样检测的间隔期比较短(40 天)有关。从表 22 可以看出, 饲料桑叶片的镉含量只稍高于 0.2 mg/kg 的国家标准(参照叶菜类), 说明饲料桑属于低镉吸收积累作物, 可以作为重金属污染土壤结构调整的经济作物之一。

**Table 22.** Analysis of the effect on nano cadmium-resistant agent type I to mulberry  
**表 22.** 纳米生态阻镉剂 I 型对饲料桑的降镉效果分析表

处理	饲料桑叶片镉含量(mg/kg)	比对照±%
A	0.224	-6.28
CK	0.239	

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 纳米生态阻镉剂降镉原理与技术集成

正光纳米材料是利用纳米材料和技术的可控形态和释放机制, 在设定的时间段, 有效释放与镉等重金属有竞争和拮抗的纳米状态的有益元素, 如锌、硒、钙、铜等[8]。但是, 实验室条件下和大田条件有很大差异, 在实验室条件添加的物质, 可以很快进行设定的化学反应, 而在大田条件下, 尤其是农民种植水稻时, 习惯上主要的肥料是在作底肥时一次性施入, 这种情况下, 各种元素的化学活性及竞争力有差异, 竞争力强于镉的元素会首先竞争土壤中那些有机质、土壤胶体提供的吸附阳离子的位点。剩下的在相同环境条件下对重金属竞争力较弱的元素, 在将来竞争植物运转蛋白位点及进入植物体通道时, 同样会处于竞争的劣势, 镉等重金属就会在植物体内富集。纳米状态的有益元素粒子, 由于其大比表面积及小尺寸效应, 具有更强的化学反应活性, 在扩散和进入植物通道及竞争植物转运蛋白位点中, 具有明显的优势。通过纳米技术的运用, 使有益元素纳米粒子在植物大量吸收相关元素时释放, 抑制镉等重金属活性并抢占植物营养吸收通道和植物运转蛋白位点, 从而减少镉等重金属在植物体内的富集。本研究结果表明, 纳米生态阻镉剂对水稻具有显著的降镉效果。提高镉治理效果的主要途径, 一是进一步优化和升级纳米技术与产品, 包括纳米材料配比、分散体系构建、pH 值的调整、以及营养元素配方等; 二是集成低镉吸收积累品种、提高土壤 pH 值、增施有机肥等农业措施, 推广“VPON”集成技术(V: 低镉品种; P: 土壤 pH 值; O: 有机肥; N: 纳米生态阻镉剂), 则更有利于在传统栽培模式下大幅降低农产品的镉含量, 提高稻米等农产品的品质和质量安全。至于集成技术在传统栽培方式和全程灌水模式下, 能在多大土壤镉背景下实现稻米镉安全, 有待于进一步的深入研究。

### 4.2. 纳米生态阻镉剂降镉适应范围分析

稻田通过水淹可以拟制水稻对镉的吸收[10]。湖南省全生育期浅水层灌溉品种筛选 3 年盆栽试验的大量数据也充分验证了这一结论。从表 11~14 可以看出, 在全生育期灌水的栽培方式下, 纳米生态阻镉剂 II 型在土壤镉背景值 0.64 mg/kg、纳米生态阻镉剂 IV 型和 V 型在土壤背景值 2.06 mg/kg 和 2.929 mg/kg 时, 稻米的镉含量均达到国家标准; 当土壤背景值大幅升高, 达到 4.0 mg/kg 时, 施用纳米生态阻镉剂 II 型的稻米镉含量仍在 0.263 mg/kg 以下, 也只是轻度超标。传统栽培方式下, 在土壤镉背景值 2.549 mg/kg 时, 处理(纳米生态阻镉剂 III 型、II 型)和对照的稻米镉含量平均为 1.675 mg/kg (详见表 15), 比国家标准高 8.375 倍; 笔者在 2014 年与中国科学院生态环境研究中心合作进行的研究中, 在土壤背景值 4.0 mg/kg 时, 10 个参试品种稻米镉含量平均为 2.418 mg/kg, 湘晚粳 13 号(湖南省低镉对照品种)的稻米镉含量也高达 1.790 mg/kg, 大大超出标准。这充分反映了水稻全生育期浅水层灌溉栽培与传统栽培方式在稻米镉含量上的巨大差异。因此, 笔者认为, 全生育期灌水的栽培模式是目前最经济有效的降镉措施, 但水稻生产实践中难以做到水分管理的精细化。

从表 16 可知, 在传统栽培方式下, 纳米生态阻镉剂 IV 型可解决轻度镉污染土壤(0.4~0.6 mg/kg)的稻米镉超标问题。根据 2013 年中国科学院生态环境研究中心先后两次对攸县稻米、土壤、灌溉水源、主要肥料进行的抽样检测, 攸县“镉大米事件”的 7 个乡镇农田土壤抽样检测的镉含量为 0.4~0.8 mg/kg, 平均为 0.6 mg/kg 左右, 灌溉水和采样肥料的隔含量均低于国家标准, 说明农田土壤镉背景值 0.6 mg/kg 左右具有普遍性和代表性, 事实上重度污染农田土壤只是局部区域, 面积并不大。也就是说, 纳米生态阻镉剂 IV 型的推广应用, 可以解决大部分镉污染农田在传统栽培方式下的镉稻米问题。

纳米生态阻镉剂 I、II、III 型对蔬菜具有较好的降镉效果。研究发现, 茄子、辣椒、芹菜对镉吸收积累能力强, 设施栽培条件下有利于对镉的吸收。在高镉土壤背景下, 无论是大棚试验还是露地试验, 辣

椒和茄子果实的镉含量均高于 0.05 mg/kg 的国家标准; 当土壤镉含量达到或接近国家土壤 III 级标准时, 辣椒的镉含量低于国家标准, 而茄子的镉含量则仍超标。因此, 辣椒、茄子生产上应采取更为有效的降镉措施。

在土壤镉含量 0.8 mg/kg 时, 纳米生态阻镉剂 II 型对芹菜的降镉效果最好, 降镉效果达到 38.13%, 大大优于 I 型和 III 型。在土壤高镉背景 1.49 mg/kg 时, III 型对萝卜的降镉率达到 17.30%~31.08%, 但对不同品种的降镉效果差异很大。由此可见, 纳米生态阻镉剂的不同剂型对不同蔬菜种类、不同品种的降镉效果是不同的, 所以应在筛选试验的基础上予以推广应用。

试验表明, 黄瓜、饲料桑属低镉吸收积累作物, 可以在中度镉污染区作为结构调整之用。

### 4.3. 纳米生态阻镉剂增产增效作用有待进一步研究

由于纳米生态阻镉剂是由纳米结构的材料与多种植物生长营养元素复合而成, 具有固水固肥、缓释等特点, 能有效改善土壤微生物区系、改良土壤、提高地力等作用, 因而在降低农产品镉含量的同时能够提高农作物的产量和品质。试验结果表明, 纳米生态阻镉剂 II 型、III 型对水稻具有明显的增产作用, 且以每 667 m<sup>2</sup> 施用纳米生态阻镉剂 40 kg 的投入产出比最高。但本研究数据来自盆栽试验, 样本量有限, 严格意义上讲只是反映了对水稻具有增产功能, 真正的增产增收作用还应通过大田试验做进一步的研究。

近年来, 随着花海旅游新业态的兴起, 香水百合成了首选的高端花卉品种。湖南春季多雨、夏季高温高湿, 因此百合花生产中病害重、花期短, 随着株洲市农业科学研究所百合花抗病育种上的重大突破, “株洲红”等一批抗病新品种问世, 使湖南露地生产百合花成为可能, 但花期短的问题依然突出。生产试验表明, 纳米生态阻镉剂 I 型对延长百合花期作用明显, 且效果稳定, 这为湖南百合产业发展和提质增效提供了新的技术支撑, 但其作用的机理有待进一步的研究。

### 4.4. 纳米生态阻镉剂应用注意事项

纳米生态阻镉剂适于作基肥施用, 操作简便, 便于推广应用。鉴于目前成本偏高, 如果是以增产提质为目标, 建议生产上以每 667 m<sup>2</sup> 施 40~80 kg 为宜; 如果是以镉治理为目标, 则应用根据治理土壤的镉含量、不同生产季节和最佳效果用量指标来综合确定纳米生态阻镉剂的用量。

纳米生态阻镉剂不能代替肥料, 建议与有机肥充分混合后使用, 更有利于提高纳米生态阻镉剂的作用。

纳米生态阻镉剂的渗透与扩散能力强, 易于流失。因此, 水田施用后应保水 5 天左右。

## 协作研究团队

本研究由株洲市农业科学研究所总农艺师龚建华、成都正光投资集团有限公司高级工程师薛合伦共同主持完成, 成都纳诺环保科技公司对研究工作给予了大力支持。湖南省蔬菜研究所、湖南集美生态农业科技开发有限公司、湖南红岭农业科技有限公司、株洲众民生态农业种养殖专业合作社、攸县丰泰水稻种植专业合作社、株洲湘民实业有限公司、株洲呈心农业有限公司等多个科研单位和农业企业参与了协作攻关。宋志伟(高级农艺师)、戴新泽(研究员)、赵定坤(研究员)、郭守斌(研究员)、陈叔鱼(研究员)、黄燕辉(高级花卉师)、郑思乡(研究员)、杨永红(高级农艺师)、雷志刚(研究员)等高级职称农业专家, 以及范芬芳(农艺师)、康敏(研究生)、周俊(农艺师)、毛莎莎(农艺师)、王淋玉(技术员)、邓雅文(技术员)、阳静(技术员)、袁勇(技术员)等科技人员直接或间接参与了此项研究工作, 在此一并表示感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] 张丽英, 白璐, 李德发, 等. 有毒有害微量元素镉及其对动物的危害[J]. 饲料工业, 2003, 24(8): 28-30.
- [2] Toppi, L.S., Lambardi, M., Pazzagli, L., Cappugi, G., Durante, M. and Gabbriellini, R. (1998) Response to Cadmium in

- Carrot *in Vitro* Plants and Cell Suspension Cultures. *Plant Science*, **137**, 119-129.
- [3] Gallego, S.M., Benav, M.P. and Tomaro, M. (1996) Effect of Heavy Metalion Excess on Sunflower Leaves: Evidence for Involvement of Exidative Stree. *Plant Science*, **121**, 151-159.
- [4] Chaoui, A., Mazhoudi, S., Ghorbal, M.H., *et al.* (1997) Cadmium and Zinc Induction of Lipid Peroxidation and Effects on Antioxidant Enzyme Activities in Bean. *Plant Science*, **127**, 139-147.
- [5] 钟秀明, 武雪萍. 我国农田污染与农产品质量安全现状、问题、及对策[J]. 中国农业资源与区划, 2007, 28(5): 27-32.
- [6] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究——镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 628-638.
- [7] 刘吉平, 郝向阳. 纳米科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 姜忠义, 成国祥. 纳米生物技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 55-68.
- [9] 龚建华, 郑思乡, 薛合伦, 等. 纳米生物肥在百合花卉生产中的应用初探[J]. 花卉, 2016, 227(10): 5-7.
- [10] 罗琼, 王昆, 许靖波, 陈光辉, 等. 我国稻田镉污染现状危害来源及其生产措施[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10540-10542.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjas@hanspub.org](mailto:hjas@hanspub.org)