

防治大米镉污染的生物及农作技术研究进展

Advances on biological and farming technology for the prevention and treatment of cadmium in rice

沈珺珺^{1,2} 林亲录¹ 罗非君¹

SHEN Jun-jun^{1,2} LIN Qin-lu¹ LUO Fei-jun¹

(1. 中南林业科技大学稻谷及副产物深加工国家工程实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004)

(1. National Engineering Laboratory for Deep Process of Rice and Byproducts, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:从分析中国大米镉污染的严峻程度和地域分布现状着手,综述采用生物技术及杂交技术和基因工程技术改变水稻的性状进而降低大米中镉的富集,微生物吸附和发酵等技术降低大米镉含量的方法;还从农作技术方面介绍添加不同肥料以降低土壤镉含量的方法。指出利用基因工程直接进行转基因和靶基因的敲除与敲低的方法虽然精准高效,但在食品安全方面尚存在争议。而通过筛选低镉富集品种,杂交技术和微生物转化镉大米则为防治大米镉污染提供了有效的生物技术途径,在土壤中添加不同的肥料降低土壤镉含量的方法的农作技术,对于当前的农业生产来说是成本低且行之有效的方法。

关键词:大米;镉污染;生物技术;农作技术

Abstract: In this paper, on account of the current situation that some rice have high cadmium content or even exceeds the national standard, the severity and regional distribution currently at home and abroad are analyzed. The necessity of controlling cadmium pollution of rice was revealed, and the methods of biotechnology and farming at home and abroad were systematically integrated, such as screening low cadmium enriched rice varieties using biological technology, hybrid technology and genetic engineering technology that includes transgene technology, gene knockout and gene silencing to improve rice traits. The microbial adsorption method and fermentation technology to reduce the cadmium content in rice, and employing farming

technology that adding different fertilizer to reduce soil cadmium content were also discussed. All these methods provide effective ways to control rice cadmium pollution.

Keywords: rice; cadmium pollution; biological technology; farming technology

镉是土壤中最具流动性和最易被生物利用的元素之一。虽然镉对植物生长和构建生物系统并不重要,但是镉容易被植物(包括谷物)的根系吸收并且传输到地表的组织。镉的富集程度取决于土壤中的镉含量以及植物的遗传属性。大米相比其他粮食作物是比较容易吸收镉的植物,镉也主要是通过大米流向人们的餐桌。人体摄入的镉并不能被生物降解和排出,所以不管是在食物链中流动最终进入人体还是直接摄入人体都将在人体内成倍地富集。镉可以与人体内能和蛋白质及酶等发生强烈的相互作用,使它们失去活性,影响各个器官,如引起肺气肿和骨质疏松,最终对肺、肾脏和肌肉骨骼、心血管造成不可逆转的损害^[1-3]。

目前中国国家标准规定安全食用大米的镉浓度不超过 0.20 mg/kg。早在 20 世纪 90 年代中国的镉污染面积就达到 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4],而近几年的报道^[5]则指出中国镉污染农田的面积已达到 $2.8 \times 10^5 \text{ hm}^2$,镉污染农田的数目整整增加了 20 余倍。在中国的广东、湖南、四川、福建、辽宁、江苏、安徽和浙江都发现了镉超标的大米^[6],中国南方镉大米的规模和严重程度已引起了国家的高度关注,亟待找到有效的解决方法,来消除这个日趋严重的食品安全隐患。本文拟从运用现代生物技术和农作技术两个方面,详述国内外防治大米镉污染的方法研究进展。以期改善中国严峻的大米镉污染问题提供一些可行的方法及思路。

基金项目:粮油深加工与品质控制湖南省 2011 协同创新项目(编号:448)

作者简介:沈珺珺,女,讲师,中南林业科技大学在读博士研究生。

通信作者:林亲录(1966—),男,中南林业科技大学教授,博士。

E-mail: linqinlu@hotmail.com

收稿日期:2018-07-25

1 降低大米镉含量的生物技术

1.1 低镉富集大米品种的筛选

试验^[7-8]证明,品种不同对镉的富集效应明显不一样。南方普遍种植的籼稻和北方普遍种植的粳稻对于镉的吸收效果相差显著,在镉污染的土壤上籼稻产的稻米更容易镉超标,这也是中国南方和中部地区种植的大米比起北方镉更易超标的一个重要因素。研究^[9]表明检测 110 种(70 种籼稻和 40 种粳稻)的镉含量,只有 3 种籼稻的镉含量超过了国家标准的 0.20 mg/kg,Grant 等^[10]研究说明不同水稻品种间因为基因碱基构成的差异,所以不同的水稻品种间镉富集含量差异较大。在中国 5 个污染区取 500 个谷物样品,发现镉污染的差别达到了 60 倍以上^[11]。在沈阳地区选取 39 个常见的粳稻种植品种在镉污染土壤(0.75 mg/kg)中进行盆栽试验,最后发现 39 个粳稻品种中糙米镉含量为 0.06 ~ 0.42 mg/kg,存在着显著的差异性^[12]。还有研究^[13]证明在中国常见种植的 12 种水稻品种中创两优 4418 籼稻超出了国家标准,并且超出南粳 9108 和通优粳 11 倍之多,达到了 0.222 mg/kg 的镉含量。这些研究都证实了不同的品种对镉的富集程度不同,所以在已被镉污染的地区对水稻品种的选择也非常重要。所以在种植之前进行大米品种的筛选,在镉污染较严重的地区选择种植低镉富集的大米品种是一种既解决了根本问题又易行的方法。

1.2 转基因改变大米的性状

转基因技术现在已经能灵活地运用在动植物的性状改造当中。镉在水稻中积累的性状也是如此。植物铁载体决定了生物强化水稻胚乳中铁和锌积累的阈值,同时抑制了镉的积累^[14-15]。Banakar 等^[14]报道转基因的水稻高表达烟草胺和 2'-脱氧麦根酸配体,积累了 4 倍的铁和 2 倍的锌,并且竞争性抑制了镉的吸收。与野生型对照相比,snat1 表达过度的水稻植株对镉和衰老胁迫有明显的抗性^[14]。转基因技术能够显著地改善镉吸收和富集的状况,对品质的改良有积极意义^[15]。转基因技术是科学发展前沿的高技术,可以将优良的性状通过基因工程的手段在想要改造的生物中表达,但转基因大米尚存在食品安全的争议问题。

1.3 杂交法改变大米的性状

中国在通过杂交改变水稻的性状方面达到了国际领先的水平。据宗锦涛^[16]的报道中国的低镉水稻杂交已经取得了突破性的进展,低镉水稻在含镉 1.5 mg/kg 的高镉土壤上生长,稻谷中平均镉含量为 0.06 mg/kg,比对照组的稻谷镉含量都下降了 90%以上,取得了重大的突破,远低于国标的 0.20 mg/kg。通过杂交的方法改变稻谷镉富集的水平,是一种既经济又安全的方法。

1.4 镉迁移基因的敲除与敲低

基因敲除是通过分子生物学的手段使特定的功能性基因缺失或者失活的最直接和有效的方法^[17]。Sasaki 等^[18]的研究表明采用基因敲除技术敲除 *Nramp5*(自然抗性相关的

巨噬细胞蛋白)基因以后,在水稻根和芽中镉的含量都会明显减少,锰含量也减少,然而水稻的生长受影响,产量会降低。最新的研究结果^[19]表明用 CRISPR/Cas9 基因技术敲除 *OsNramp5* 基因,这个金属转运基因敲除后,谷物中镉浓度的浓度一直低于 0.05 mg/kg,而在 Huazhan(野生型籼稻)中,Cd 浓度为 0.33~2.90 mg/kg。在 *OsNramp5* 突变体中,镉的含量显著降低,而稻谷的产量没有受到明显的影响。此研究为发展抗镉污染的籼稻品种提供了一种实用的方法,减少了谷物中镉污染的风险。基因敲低是用的 RNA 干扰技术而非同源重组技术用双链的 RNA 分子或转录载体使靶标基因的 mRNA 降解或合成受阻,也就是并没有发生相应基因 DNA 的替换而是阻止或降低它的转录水平^[20]。Uraguchi 等^[21]的研究表明用 RNA 干扰技术沉默 *OsLCT1* 转录子,则籼稻中的镉富集只有正常没有基因沉默的对照组(即正常组)的差不多一半的量。基因敲除和基因沉默都是先进的基因工程手段,该方法能靶向定位跟镉富集相关的基因,但是在食品安全方面可能也存在争议。

1.5 微生物吸附或发酵降低大米中的镉

曹霞^[22]发现包括细菌、真菌和藻类多种微生物对重金属镉有明显的吸附作用。刘也嘉等^[23]报道了用强化菌株比例为 1:1 的嗜热链球菌和德氏乳杆菌可以将镉超标 2 倍以上的大米脱除 70%以上的镉。陈瑶等^[24]的研究则发现大米用 1:1:1(体积比)的罗伊氏乳杆菌、发酵乳杆菌、植物乳杆菌发酵,经过优化得到在大米粒度 40 目,接种量 3%,料液比 1:5 (g/mL),温度 37 ℃,发酵时间 21 h 的条件下,脱镉率可达到 89.98%。王年忠^[25]的研究表明对于在水料比为 2.7 时,淀粉利用率和出酒率分别为 93.5%和 53%,利用率较高,镉并未对酵母产生明显的抑制作用。李春生等^[26]的研究也发现酵母菌对大米中的镉有明显的吸附作用,为囤积的镉大米去库存提供了有意义的技术途径。利用紫外线诱变鲁氏酵母可使鲁氏酵母的镉吸附能力增强,比亲本菌株提高了 7.01%~15.03%,镉抗性也增强。

2 镉污染治理的农作技术

2.1 镉污染土壤中添加生物炭

生物炭是物质在限氧环境中热化学转化所得的固体物质^[27]。它的原材料可以是稻秆、动物骨头、植物根茎等农业废弃物,生物炭的原料易得且成本低廉,是新颖和有效的一种含水环境下能够吸附镉的吸附剂。近期一些研究^[28-29]发现生物炭是一种很有效的处理工业废水和重金属土壤污染的吸附剂。研究^[30-31]证实,经过酸和碱活化后的生物炭的结构以及生物炭增加表面官能团后能够更有效地吸附重金属包括镉离子^[32]。近些年,基于生物炭的纳米复合材料得到了发展,因为它可以结合生物炭和纳米结构的优点^[33-34]。纳米生物碳复合物改善了生物炭官能团、炭孔的性能、表面活性位点、催化降解的能力且比普通生物炭更易分离^[33]。

2.2 镉污染土壤中增施硅肥

研究^[35]表明,在被镉污染的土壤中增施硅肥可以有效降低水稻茎、叶、稻壳和稻米中的镉含量和土壤的 pH,还能提高水稻的产量,其中稻米的镉含量降低了 25.3%。王怡璇等^[36]发现施硅肥可促进水稻根表铁膜的形成,当施硅肥达到 800 mg/kg 时,稻米的镉含量比对照组(未施硅肥)减少了 32.76%,显著地减少了稻谷植株镉的吸收和稻米的镉含量。

2.3 镉污染土壤中加入土壤改良剂

土壤改良剂是通过化学方法用石灰、磷酸盐、高炉渣、铁盐、硅酸盐、沸石等来治理重金属污染土壤的改良剂。这些化学改良剂可以单独使用,也可以进行组合搭配,尤其是使用石灰^[37-40]和铁盐^[41-42],进行化学改良剂的搭配和组合在镉污染治理当中则更为常见。周歆等^[43]的研究分别用 2:1 的石灰石 CaCO_3 和海泡石 $\text{Mg}_8(\text{H}_2\text{O})_4[\text{Si}_6\text{O}_{16}]_2(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$,羟基磷灰石 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ 和沸石作为组配改良剂加入重金属污染的土壤,而后在糙米中检测到镉含量下降了 23.2%~43.8%,效果显著。

2.4 镉污染土壤中增施有机粪肥

在镉污染土壤中施加家禽家畜粪便作为有机肥料,对减少水稻对镉的富集有显著效果。猪粪作为有机肥处理以后稻米的镉含量比对照下降 37.5%,鸡粪作为有机肥处理以后稻米的镉含量比对照下降 22.5%,用稻草作为有机肥处理后稻米的镉含量比对照下降 7.5%^[44]。比较而言,施用猪粪、鸡粪降低稻米镉含量主要是降低了水稻植株对土壤镉的富集,而施用稻草则主要是降低了水稻茎中镉向稻米的转运。

2.5 镉污染土壤中加入硒肥

最新的研究^[45]表明,施用硒肥可以明显降低镉对水稻的生长抑制作用,同时能降低水稻对镉的富集,对于杂交稻来说,子代水稻的镉含量与父本水稻相仿而低于母本水稻。有研究者^[46]在湖北恩施的富硒土壤中选用 7 种农作物包括土豆、茶叶、玉米、水稻、魔芋、白菜、萝卜,考察其根系硒与镉的相互作用,结果显示,以水稻、白菜和萝卜 3 种作物硒对根系中镉含量影响最明显。根据梁程等^[47]的报道硒能降低镉对水稻的生长抑制,提高了水稻幼苗中 GSH 和 PCs 的含量,促进水稻体内镉和 PC 的络合作用,从而减缓镉对水稻幼苗的毒害。庞晓辰等^[48]发现,在 Cd 处理浓度为 5.0 $\mu\text{mol/L}$ 条件下,外源硒(IV)会显著降低水稻对镉的吸收和转运。李虹颖等^[49]发现土壤中镉浓度水平一致时,随着硒浓度增加,稻米中的镉含量显著下降。

3 展望

大米降镉可以从源头上利用生物技术包括杂交、基因工程,筛选镉低富集的品种,也可以利用微生物吸附或发酵等方法对大米的最终产品进行改良。此外,还可以通过农作施肥的方式降低土壤中镉的含量。利用现在生物技术的前沿方法——基因工程按照人们的意愿改良水稻的性状,使口感

好、丰产的优良水稻品种成为低镉富集的品种,但也是尚有争议的转基因方法。相对传统的微生物吸附和发酵的生物技术也可以为已有的镉大米去库存提供良好的低成本的解决方案。

在农作技术方面,效果显著且成本低廉易操作的是往镉污染的土壤里加活性炭、有机粪肥、土壤改良剂等方法。增施硅肥可以降低镉从土壤中的吸收,也可以提高产量;增施硒肥除了降低大米的镉吸收以外,还能增加大米里的硒元素含量,但成本较高。综上所述,利用现代生物技术和农作技术,对镉污染进行综合治理大有可为,可以通过多种技术方法来解决水稻中镉含量超标的问题。

参考文献

[1] GODT J, SCHEIDIG F, GROSSE-SIESTRUP C, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health[J]. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2006, 1: 22-27.

[2] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. Toxicology Letters, 2003, 137(1/2): 65-83.

[3] FAROON O, ASHIZAWA A, WRIGHT S, et al. Toxicological Profile for Cadmium[M]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012: 15.

[4] 国家环境保护总局. 中东部地区生态环境现状调查报告[J]. 环境保护, 2003, 26(8): 3-8.

[5] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V: 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.

[6] XIE Li-hong, Tang Shao-qing, WEI Xiang-jin, et al. The cadmium and lead content of the grain produced by leading Chinese rice cultivars[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 217-224.

[7] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. Sci Total Environ, 2008, 390(2/3): 301-310.

[8] URAGUCHI S, FUJIWARA T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice, 2012, 5(1): 1-8.

[9] YANG Qian-wen, LAN Chong-yu, WANG Hong-bin, et al. Cadmium in soil-rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1/2): 147-152.

[10] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. Sci Total Environ, 2008, 390: 301-310.

[11] KE Shen, CHENG Xi-yu, ZHANG Ni, et al. Cadmium contamination of rice from various polluted areas of china and its potential risks to human health[J]. Environ Monit Assess, 2015, 187: 1-11.

[12] ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng, et al. Identification of rice cultivar with exclusive characteristic to Cd using a field polluted soil and its foreground application[J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20: 2 645-2 650.

[13] HUANG Gao-xiang, DING Chang-feng, GUO Fu-yu, et al. The Role of node restriction on cadmium accumulation in the brown rice of 12 Chinese rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(47): 10 157-10 164.

[14] BANAKAR R, ALVAREZ Fernandez A, DÍAZ-BENITO P, et al. Phytosiderophores determine thresholds for iron and zinc accumulation in biofortified rice endosperm while inhibiting the accumulation of cadmium[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(17): 4 983-4 995.

[15] LEE K, BACK K. Overexpression of rice serotonin *N*-acetyltransferase1 in transgenic rice plants confers resistance to cadmium and senescence and increases grain yield[J]. Journal of Pineal Research, 2017, 62(3): e12392.

[16] 宗锦涛. 低镉杂交水稻选育取得突破性进展[J]. 湖南农业科学, 2017(9): 27.

[17] 周维, 付喜爱, 张德显, 等. 基因敲除技术的进展[J]. 中国兽医, 2015, 51(3): 67-69.

[18] SASAKI A, YAMAJI N, YOKOSHO K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. Plant Cell, 2012, 24(5): 2 155-2 167.

[19] TANG Li, MAO Bi-gang, LI Yao-kui, et al. Knockout of OsNramp5 using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating indica rice without compromising yield[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14 438.

[20] 刘培楠, 吴国利. 基础分子生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 169.

[21] URAGUCHI S, KAMIYA T, SAKAMOTO T, et al. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(52): 20 959-20 964.

[22] 曹霞. 耐铅镉微生物的筛选及其对污染土壤铅镉化学形态的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009: 1-3.

[23] 刘也嘉, 林亲录, 肖冬梅, 等. 大米乳酸菌发酵降镉工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 34(7): 276-282.

[24] 陈瑶, 廖宇艳, 吴卫国. 混菌发酵消减大米中镉的工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 44-49.

[25] 王年忠. 镉超标大米酒精发酵技术的研究[J]. 轻工科技, 2014, 30(6): 27-28.

[26] 李春生, 徐莹, 姜维, 等. 对镉高抗性及吸附性的鲁氏酵母突变株的选育[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(12): 49-53.

[27] DENYES M J, PARISIEN M A, RUTTER A, et al. Physical, chemical and biological characterization of six biochars produced for the remediation of contaminated sites[J]. Journal of Visualized experimental, 2014, 93: e52183-e52194.

[28] AHMAD M, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review[J]. Chemosphere, 2014, 99(3): 19-23.

[29] UCHIMIYA M, LIMA I M, KLASSON K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (CuII, CdII, NiII, and PbII) by broiler litter derived biochars in water and soil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(9): 5 538-5 544.

[30] LIU Pei, LIU Wu-jun, JIANG Hong, et al. Modification of bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution[J]. Biore-source Technology, 2012, 121: 235-240.

[31] BASHIR S, ZHU Jun, FU Qing-ling, et al. Comparing the adsorption mechanism of Cd by rice straw pristine and KOH-modified biochar[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, doi: 10. 1007/s11356-018-1292-z.

[32] RAJAPAKSHA A U, CHEN Season-sheng, TSANG D C W, et al. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification[J]. Chemosphere, 2016, 148: 276-291.

[33] TAN Xiao-fei, LIU Yun-guo, GU Yan-lin, et al. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: a review[J]. Bioresource Technology, 2016, 212: 318-333.

[34] ARABYARMOHAMMADI H, DARBAN A K, ZEE Seattm van der, et al. Fractionation and leaching of heavy metals in soils amended with a new biochar nanocomposite[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(7): 6 826-6 837.

[35] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1 027-1 033.

[36] 王怡璇, 刘杰, 唐云舒, 等. 硅对水稻镉转运的抑制效应研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1 822-1 827.

[37] MENG Jun, ZHONG Li-bin, WANG Lu, et al. Contrasting effects of alkaline amendments on the bioavailability and uptake of Cd in rice plants in a Cd-contaminated acid paddy soil[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(9): 8 827-8 835.

[38] HUANG Gao-xiang, DING Chang-feng, GUO Fu-yu, et al. Underlying mechanisms and effects of hydrated lime and selenium application on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(23): 18 926-18 935.

[39] HE Yan-bing, HUANG Dao-you, ZHU Qi-hong, et al. A three-season field study on the in-situ remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar[J]. Ecotoxicology and Environment Safety, 2017, 136: 135-141.

[40] 史磊, 郭朝晖, 梁芳, 等. 水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 111-117.

[41] 叶欣怡, 赵杏, 王小鹏, 等. 土壤亚铁、镉对水稻 2 种抗氧化酶和植株富集镉量的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2016, 42(1): 89-98.

埋或者吸附在包合物的表面,在包埋过程中造成损失。因此,如何进一步提高挥发油的包埋率和包埋得率,还需深入探讨。

参考文献

[1] 王岳峰, 范静娴, 许冬强. 野黄桂叶挥发性成分色谱-质谱联用分析[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(12): 2 923-2 924.

[2] 王岳峰, 曲方圆, 朱利平. 野黄桂叶油抗菌活性的实验研究[J]. 新中医, 2007, 39(5): 105-106.

[3] JUN Tian, BO Huang, XIU Li-luo, et al. The control of *Aspergillus flavus* with *Cinnamomum jensenianum* Hand-Mazz essential oil and its potential use as a food preservative[J]. Food Chemistry, 2012, 130(3): 520-527.

[4] LALLY J Y, VILHOEN A M, VAN S V. Potential interaction between the volatile and non-volatile fractions on the in vitro antimicrobial activity of three South African Pelargonium (Geraniaceae) species [J]. Natural Product Communications, 2010, 5 (9): 1 395-1 400.

[5] 李凤清. 植物精油的抑菌评价及其应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2014: 1-10.

[6] ORLANDA J F F, NASCIMENTO A R. Chemical composition and antibacterial activity of *Ruta graveolens* L. (Rutaceae) volatile oils, from São Luís, Maranhão, Brazil [J]. South African Journal of Botany, 2015, 99: 103-106.

[7] YANG Yuan, ZHI Yan-kong, YING En-sun, et al. Complex co-acervation of soy protein with chitosan: Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery [J]. LWT-Food Science and

Technology, 2017, 75: 171-179.

[8] 相聪坤, 张静宜, 李佳佳, 等. 白术、桂枝挥发油 β -环糊精包合工艺研究及其包合物评价[J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29 (1): 46-51.

[9] 韩春然, 张静, 李煜. 超声波法制备丁香精油- β -环糊精微胶囊[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 97-100.

[10] 彭颖. 肉桂精油的提取及其微胶囊化的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2012: 1-10.

[11] 陈琳皓, 单杨, 李高阳, 等. 复凝聚法制作甜橙香精微胶囊工艺研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 198-202.

[12] 刘光宪, 周巾英, 祝水兰, 等. 沙棘籽油微胶囊的制备及其性质研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 194-197.

[13] 强军锋. 壁材比例对复合凝聚法天然 V_E 微胶囊包埋效果的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 175-178.

[14] 方宇, 蒋生旺, 曹颖, 等. 复凝聚法制备茶油微胶囊[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 181-185.

[15] JANG S H, JANG S R, LEE G M, et al. Halloysite nanocapsules containing thyme essential oil: preparation, characterization, and application in packaging materials [J]. J Food Sci, 2017, 82(9): 2 113-2 120.

[16] 陈发河, 吴光斌, 陈志辉. 天然胡萝卜素 β -环糊精微胶囊制备工艺的研究[J]. 中国食品学报, 2006(1): 110-115.

[17] REGIANE V B F, DIEGO A B, ERIC K S, et al. Cashew gum and inulin: New alternative for ginger essential oil microencapsulation[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 133-142.

[18] 袁超, 祁鲲, 朱新亮, 等. 茉莉精油/羟丙基- β -环糊精包合物的制备及表征[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 85-89.

(上接第 175 页)

[42] LIN Jia-jiang, SU Bin-lin, SUN Meng-qiang, et al. Biosynthesized iron oxide nanoparticles used for optimized removal of cadmium with response surface methodology [J]. The Science of Total Environment, 2018, 627(1): 314-321.

[43] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响[J]. 土壤学报, 2014(3): 555-563.

[44] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 826-832.

[45] HUANG Bai-fei, XIN Jun-liang, DAI Hong-wen, et al. Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza*

sativa) system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(43): 9 537-9 546.

[46] 袁知洋, 项剑桥, 吴冬妹, 等. 恩施富硒土壤区主要农作物硒镉特征以及和根系土硒镉关系研究[J]. 资源环境与工程, 2017, 31(6): 706-712.

[47] 梁程, 林匡飞, 张雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 857-866.

[48] 庞晓辰, 王辉, 吴泽赢, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1 679-1 685.

[49] 李虹颖, 唐杉, 王允青, 等. 硒对水稻镉含量及其在亚细胞中的分布的影响[J]. 生态环境学, 2016, 25(2): 320-326.

(上接第 204 页)

[9] 刘江生, 赖伟玲, 蔡国华, 等. KLD2-3 滚筒烘丝机筒壁温度不同控制模式对化学成分的影响[J]. 安徽农业学报, 2013, 41 (2): 824-826, 829.

[10] 胡建军, 周冀衡, 熊燕, 等. 烘丝工艺参数对烘后叶丝质量影响的研究[J]. 中国烟草学报, 2007, 13(6): 24-29.

[11] 段鹏. 烟丝变温干燥特性研究[D]. 郑州: 郑州烟草研究院, 2014: 28-45.

[12] 王岩. 叶丝滚筒分段变温干燥特性研究[D]. 郑州: 郑州烟草研

究院, 2015.

[13] 国家烟草专卖局. YC/T 31—1996 烟草及烟草制品试样的制备和水分的测定烘箱法[S]. 郑州: 国家烟草质量监督检验中心, 1996: 1-3.

[14] 国家烟草专卖局. YC/T 138—1998 烟草及烟草制品 感官评价方法[S]. 郑州: 国家烟草质量监督检验中心, 1998: 3-5.

[15] 王瑞新. 烟草化学[M]. 郑州: 中国农业出版社, 2003: 67-69.

[16] 明宁宁, 郭俊成, 刘强, 等. 烟草中生物碱的提取和分析方法研究进展[J]. 中国烟草学报, 2007, 13(3): 64-70.