

# 稻米籽粒中镉的富集规律与分布及消减方法研究进展

鲁思琴<sup>1</sup>, 易江<sup>1</sup>, 陈渠玲<sup>2</sup>, 甘平洋<sup>1</sup>, 张源泉<sup>2</sup>, 裴健儒<sup>2</sup>, 朱凤霞<sup>2</sup>, 黄天柱<sup>1</sup>

(1. 中南粮油食品科学研究院有限公司, 长沙 410008; 2. 湖南粮食集团有限责任公司, 长沙 410008)

**摘要:**对稻米籽粒中镉的来源、吸收转运机制, 以及分布和形态进行了分析, 并对稻米籽粒中镉的消减方法进行了总结, 以为后续的研究提供思路和参考。

**关键词:**镉; 消减技术; 大米蛋白; 大米淀粉; 积累

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)01-0094-05

## Research Progress on Enrichment Regularity, Forms and Reduction Methods of Cadmium in Rice

LU Siqin<sup>1</sup>, YI Jiang<sup>1</sup>, CHEN Quling<sup>2</sup>, GAN Pingyang<sup>1</sup>, ZHANG Yuanquan<sup>2</sup>, PEI Jianru<sup>2</sup>, ZHU Fengxia<sup>2</sup>, HUANG Tianzhu<sup>1</sup>

(1. Central South Grain and Oil Food Science Institute Co., Ltd, Changsha 410008; 2. Hunan Grain Group Co., Ltd, Changsha 410008, China)

**Abstract:** In order to provide ideas and references for the follow-up studies, the source, absorption and transport mechanism, distribution and morphology of cadmium in rice were analyzed in the paper. The reduction methods of cadmium in rice were summarized.

**Key words:** Cadmium; Reduction methods; Rice protein; Rice starch; Accumulate

土壤酸化和重金属污染一直是我国农田治理的难题, 近几十年来, 日益强烈的人类活动, 大大加速了我国农田土壤的酸化进程<sup>[1]</sup>。土壤的酸化活化了土壤中部分重金属元素, 也由此加重了重金属污染对我国农作物的危害<sup>[2]</sup>。“镉大米”是农作物受重金属污染的产物之一, 近年来给人们带来的危害有逐渐加剧的趋势。为应对“镉大米”带来的危害, 各行各业的专家开展了一系列重金属污染防治研究, 取得了一定的成效, 但是对于“镉大米”的处置仍然存在难题亟待解决。本文先从稻米籽粒中镉的来源、分布差异和存在的形态进行分析, 然后从稻米籽粒中镉消减的物理法、化学法、生物法, 以及其他方法进行归类分析, 以期从稻米中镉的富集规律和消减方法等方面为后续研究提供思路和参考。

### 1 镉在水稻体内的吸收和转运

镉元素进入水稻植株一般以根系吸收为主, 同时也存在茎叶吸收。水稻根系对土壤中重金属镉的吸收与其他金属离子类似, 主要经历两条途径: (1) 共质体途径的主动运输。重金属镉通过胞间连丝在细胞与细胞间移动转运, 这个过程属于主动吸收, 需要消耗能量。研究表明, 共质体途径吸收能力的强弱与土壤温度密切相关, 适宜的土壤耕作层温度促进根系吸收<sup>[3-4]</sup>。(2) 质外体途径的被动运输。重金属镉在细胞与细胞间的空隙、细胞壁等形成的质外体空间中进行移动, 最后扩散到维管柱内。这个过程主要是利用浓度差进行移动, 因为没有细胞膜的阻碍, 因此移动速度快。重金属镉从外部质外体进入内部质外体时, 还需通过凯氏带的阻碍, 通常需要特殊的转运蛋白才能将重金属镉离子运输到木质部。镉在木质部的装载和运输过程对稻米籽粒中镉的积累影响巨大, 木质部中的镉离子通过液泡膜上的转运蛋白进入导管, 蒸腾作用和根压则影响着导管中的镉向地上部转移。镉通过茎节从木质部转运

收稿日期: 2019-01-18

基金项目: 长沙市科技计划项目经费资助(kq1706164); 湖南省科技计划项目经费资助(2017SK2384)

作者简介: 鲁思琴(1991-), 女, 在读硕士, 研究方向为食品科学与工。

到韧皮部<sup>[5]</sup>, 韧皮部的运输过程对稻米籽粒中镉的积累有着重要影响, 有研究发现, 绝大部分镉都通过韧皮部积累至稻米籽粒中<sup>[6]</sup>。由于水稻对镉的吸收和转运途径多而杂, 因此不论是土壤温度、pH, 还是其他可对镉吸收产生拮抗作用的元素含量, 都会影响水稻植株对镉的吸收和转运, 从而直接影响镉在稻米籽粒中的含量。

## 2 稻米籽粒中镉的来源

镉元素极易被农作物吸收积累, 水稻更是镉污染的主要作物。土壤、灌溉水、肥料、大气粉尘中的镉都有可能被水稻植株吸收, 成为稻米籽粒中镉污染的来源。一般来说, 稻米籽粒中的镉主要通过水稻根系直接从土壤中吸收, 因此, 籽粒中的镉含量很大程度上是由土壤中的镉含量决定<sup>[7]</sup>, 这是因为土壤中的镉是直接污染源。喻华等<sup>[8]</sup>研究表明, 稻米籽粒中的镉主要来源于土壤中镉的吸收和直接运输, 以及齐穗前各根、茎、叶储存镉的再分配, 土壤中可供利用的镉含量越高, 籽粒含镉量也就极易因吸收富集而升高。灌溉水和大气降尘也是稻米籽粒中镉的来源之一, 相较于土壤来源的镉更易被水稻吸收积累。大气降尘来源的镉一部分在进入土壤后被水稻根系吸收转运, 逐步积累在稻米籽粒中; 一部分被水稻茎叶直接吸收<sup>[9]</sup>。有研究表明, 稻米籽粒中镉的含量与叶面中镉的含量密切相关, 呈显著线性关系, 因而推测对稻米籽粒中镉积累的贡献顺序依次为叶面污染源、灌溉水污染源、土壤污染源<sup>[10]</sup>, 这与张敏等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。

## 3 稻米籽粒中镉的分布差异和存在的形态

稻米籽粒主要由颖壳、果皮、胚、胚乳组成, 而不同组分中镉的含量表现不同。田阳等<sup>[12]</sup>通过控制碾米精度获得稻谷的不同组成部分, 并测定其中的镉含量大小。结果发现不同组分中镉含量大小依次为: 糠层>颖壳>外层胚乳>中间层胚乳>核心层胚乳, 这说明除去不可食用的稻壳, 稻谷籽粒镉积累量有从外到内逐渐降低的趋势。杨居荣等<sup>[13]</sup>研究发现, 镉在稻谷各组成结构中的浓度分布顺序是: 皮层>胚>胚乳>颖壳, 但由于胚乳是稻谷的最主要组成部分, 占的总量也最大, 因此就镉总量而言, 胚乳中所占比例仍然最高。总的来说, 镉在稻谷皮层和胚中含量最高<sup>[14]</sup>。胚乳中镉的含量相对较少。稻米籽粒中镉主要以与蛋白质

相结合的形式存在, 约占稻米籽粒中镉总量的60%, 其中以与盐溶性蛋白结合的数量最高, 碱性次之。稻米籽粒中镉还与半纤维素、纤维素、脂肪等生物成分相结合, 约占稻米籽粒中镉总量的40%, 其中与半纤维素、纤维素结合的数量较多, 脂肪结合的数量极少<sup>[15]</sup>。稻米籽粒中的蛋白质含量一般在7%~8%, 根据常用分类可分为清蛋白(水溶性蛋白)、球蛋白(盐溶蛋白)、醇溶蛋白(溶于70%乙醇)和谷蛋白(溶于稀酸或稀碱)<sup>[15]</sup>。清蛋白占稻米籽粒蛋白质总量的2%~5%, 球蛋白占2%~10%, 都是由单链组成的低分子量蛋白质; 谷蛋白占75%~90%, 由多肽链彼此通过分子内二硫键连接而成; 醇溶蛋白占1%~5%, 是由一条单肽链通过分子内二硫键连接而成<sup>[16]</sup>。查燕等<sup>[17]</sup>采用连续提取法提取大米中的4种蛋白质, 结果发现, 稻米籽粒中镉与球蛋白、谷蛋白结合的数量最高, 其次为清蛋白, 结合量最少的是醇溶谷蛋白。镉易与富硫大米蛋白结合, 主要是以配位结合的形式存在<sup>[18]</sup>, 镉-蛋白配位化合物的表观相对分子质量约为54.5 KD和5.5 KD<sup>[19]</sup>。

## 4 稻米籽粒中镉的消减方法

### 4.1 物理法

物理法是运用碾米、浸泡等物理手段消减稻米籽粒中镉的方法, 主要是利用稻米籽粒中镉的分布差异和存在部分游离态镉, 通过运用物理的手段将其分离。

#### 4.1.1 精加工法

市场上所售的供食用大米, 都需要经过砻谷、碾米、抛光等一系列工艺加工生产而成, 利用稻米籽粒中镉含量由外向内逐渐递减的规律, 可在一定程度上消减稻米籽粒中的镉, 使稻米籽粒的镉含量降低。魏帅等<sup>[20]</sup>研究发现, 稻米砻谷、碾米可通过脱除稻壳、皮层和胚等消减稻谷中一部分的镉, 当控制碾米精度为23.83%时, 镉含量低于0.288 mg/kg的糙米可通过碾米工艺获得镉含量达标( $\leq 0.2$  mg/kg)的精品米, 大量研究都发现了相近的研究结果<sup>[21-22]</sup>。虽然精加工法具有简便、无污染、大米形态基本不被破坏等优点, 但是并不适用于镉含量较高的稻米。

#### 4.1.2 浸泡法

常规制作米发糕、米粉、米酒等米发酵制品的工艺都包含浸泡工序, 在浸泡过程中, 部分游离态的镉会溶出到水中, 借此可消减稻米中的镉。

陆金鑫等<sup>[23]</sup>发现浸泡后, 稻米籽粒中的镉含量可降低约40%, 推测浸泡会使籽粒内层的镉向络合力更强的表层蛋白迁移, 同时淀粉分子间的游离态镉会不断溶出。刘晶等<sup>[24]</sup>研究发现, 浸泡过程中, 重金属元素迁移至浸泡液中呈现出随温度升高而增加的规律, 以30℃下浸泡30 h为终点, 镉的迁移量为33.71%。

## 4.2 化学法

化学法是通过利用化学溶剂的特性, 使稻米籽粒中游离态、结合态镉逐步分离、释放出来的方法。

### 4.2.1 酸溶浸提

酸液一方面可减弱镉与稻米籽粒中蛋白质、淀粉的结合力, 从而不断释放出游离态的镉, 另一方面可与游离态的镉形成更加稳定的络合物, 促进籽粒中结合态镉的释放。许艳霞等<sup>[25]</sup>将稻米籽粒加入至柠檬酸和氯化钠的混合溶液中, 在最佳条件下, 稻米籽粒中的镉含量降低了82.20%。Wu等<sup>[26]</sup>将糙米粉加入至0.08 mol/L的柠檬酸溶液中, 在45℃条件下恒温振荡处理53.09 min, 镉的消减率可达94.28%。傅亚平等<sup>[27]</sup>比较了几种常见的有机酸对稻米籽粒中镉消减率的影响, 结果表明乳酸的效果最好, 在最优条件下, 镉的消减率可达98.01%。

### 4.2.2 碱法

碱法处理一般用于提取稻米中的淀粉。碱液处理的稻米籽粒, 使籽粒中的淀粉与蛋白质之间的结合力变弱, 结构变疏松, 易于分离。同时碱液破坏了蛋白质高级结构间的次级键, 使一部分氨基酸侧链基团解离, 增加了蛋白质的水溶性, 从而实现大米淀粉与蛋白质的分离。田阳等<sup>[28]</sup>用响应面优化法得出, 以液料比为6.8:1, 质量分数为0.23%的NaOH处理大米粉, 在反应16 h后, 可得到纯度为97.02%的淀粉, 此时镉的消减率达84.77%。姜毅康等<sup>[29]</sup>用响应面法优化碱液提取淀粉条件, 在最优条件下可获得纯度为94.76%的淀粉, 镉的消减率达87.90%。利用碱法提取淀粉, 可消减淀粉中的镉, 同时, 获得的蛋白质经过进一步除镉, 可获得镉消减后的蛋白产品。

## 4.3 生物法

### 4.3.1 微生物法

微生物法是通过添加乳杆菌、酵母菌等微生物强化大米发酵过程, 达到消减大米中镉的方法。一方面乳杆菌、酵母菌等微生物在生长增殖过程中会利用大米中的蛋白质、淀粉、脂肪、糖类

等营养物质, 并使其结构发生改变, 另一方面微生物发酵产生的代谢产物乳酸会降低发酵液的pH, 甚至部分与镉络合。总而言之, 发酵有助于释放出重金属镉, 镉或溶于发酵液, 或被吸附于乳杆菌、酵母菌等微生物上, 从而被脱除。傅亚平等<sup>[30]</sup>以镉超标精米为材料, 以植物乳杆菌、戊糖片球菌为菌种, 研究了菌种接种量、大米粉粒度, 以及发酵温度和时间对镉消减率的影响。在优化发酵条件后, 镉的消减率可达85.73%, 并推测乳杆菌发酵消减大米中的镉时, 起主要作用的是代谢产物乳酸<sup>[31]</sup>。刘也嘉等<sup>[32]</sup>利用米粉生产车间的发酵菌液, 联用植物乳杆菌、德氏乳杆菌、嗜热链球菌等微生物菌种对镉超标大米进行发酵, 镉的消减率达79.24%。陈瑶等<sup>[33]</sup>选取罗伊氏乳杆菌、发酵乳杆菌、植物乳杆菌为菌种(悬液体积比为1:1:1)对镉超标稻米进行发酵处理, 优化发酵条件后, 镉的消减率达89.98%。

### 4.3.2 酶法

酶法是利用酶水解大米淀粉或大米蛋白, 从而提取大米淀粉或大米蛋白的方法。酶解破坏了镉与大米蛋白、淀粉之间的结合键, 可使镉游离出来得以消减。宋娜等<sup>[34]</sup>选用4种酶分别提取大米蛋白, 结果发现碱性蛋白酶提取率最高, 在最佳条件下, 蛋白质的提取率可达76.42%。黄武宁等<sup>[35]</sup>采用新型淀粉酶—脱枝酶对大米蛋白进行提取, 获得了总氮质量分数达90.58%的大米粗蛋白, 纯度较传统酶法大幅提高。田阳<sup>[36]</sup>利用中性蛋白酶制备大米淀粉, 获得了纯度为89.73%的大米淀粉, 提取率为80.23%, 淀粉中的镉消减率为73.53%。不论是淀粉酶破坏大米淀粉与镉的结合力, 还是蛋白酶破坏大米蛋白与镉的结合力, 均可对大米中镉的释放产生影响, 若采用适合的酶, 对镉超标稻米进行一定程度的水解, 有望提高大米产品中镉的消减率。

## 4.4 其他方法

### 4.4.1 吸附法

利用具有吸附作用的特殊材料, 可以促使大米中的镉不断溶出, 同时在吸附材料中富集, 从而显著消减稻米籽粒中的镉含量。Motaghi<sup>[37]</sup>和Ziarati<sup>[38]</sup>分别用改性后的香蕉皮、柠檬皮浸泡漂洗大米, 结果发现改性后香蕉皮、柠檬皮可以吸附大米中的镉, 镉含量分别减少93.20%、96.40%。

天然低共熔溶剂(NADES)是指一定化学计量比的2或3种天然产物(氢键供体和氢键受体)混合后通过加热的方式, 使分子间氢键相互缔合而

形成的均匀液体<sup>[39]</sup>,具有成本低、可回收利用、低/无毒性、生物可降解性等优越性能而备受推广,在有机合成、生物催化、提取分离等领域均有应用<sup>[40]</sup>。Huang等<sup>[41]</sup>将20种由氯化胆碱和甘油制备的天然低共熔溶剂作为洗涤剂处理大米粉,结果表明,基于氯化胆碱的天然低共熔溶剂镉去除效果良好,去除率在51%~96%之间。黄瑶等<sup>[42]</sup>将15种加热法合成的天然低共熔溶剂作为洗脱剂处理大米粉,镉去除率达到15%~96%,并用镉去除率表现较好、黏度较低的天然低共熔溶剂ChXy作为材料,通过吸附动力学和吸附热力学的方式研究其镉去除机制,研究结果说明天然低共熔溶剂吸附过程是以化学吸附为主的多分子层吸附<sup>[43]</sup>。

#### 4.4.2 电化学法

电化学法用于土壤中重金属镉修复治理的研究较多<sup>[44]</sup>,受土壤缓冲容量的制约,电化学法难以使土壤pH值降低到合适的水平,修复效果不佳<sup>[45]</sup>,但是也有修复效果较好的土壤电化学修复法<sup>[46]</sup>。稻米籽粒中镉的电化学消减法是通过电场作用提高大米粉与电解液中的离子交换达到消减大米粉中镉的方法。杨纯<sup>[47]</sup>考察了电化学法对大米蛋白含量和镉含量的影响,在最佳条件下,添加浓度0.15 mol/L的缓冲液,控制溶液温度为45℃,pH值为5,控制电压为25 V,大米粉中镉的消减率为62.68%。

## 5 总结与展望

本文主要对物理、化学、生物等消减大米中镉的方法进行了整理归类,可知各种方法均有优劣,物理法简便、无污染,而且大米特性基本不改变,但镉消减率不高;化学法运用化学手段将镉从大米中分离,方法较简便,镉消减率较高,但是化学助剂消耗较大,还会产生化学残留问题;生物法利用酶和微生物将镉从大米中分离,镉消减率较高,但是大米特性变化较大,营养物质消耗和流失较大;吸附法镉消减率较高,由于是采用生物/天然材料吸附大米中的镉,对于后续制成大米粉、大米淀粉、大米蛋白等可食用产品原料的安全性影响较小,后续的研究价值巨大。笔者认为,采用稻米制作的食品种类繁多,加工方法也不尽相同,其中许多米制品在生产工艺中需要采用酶、微生物发酵等不同的方法来调质调优,稻米的不同组分也可用作不同用途,结合不同的生产需要、不同的产品类型,研究针对不同米制食品的镉消减方法应该可以产生更好的效果,不同

镉含量的稻米也将会有更好的分类方法及处置方法。另外,综合采用或者分阶段采用多种镉消减方法,将各种镉消减方法的优势与特色结合起来,应该具有广阔的研究与应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 陈冠宁,宋志峰,魏春雁.重金属检测技术研究进展及其在农产品检测中的应用[J].吉林农业科学,2012,37(6):61-64,71.
- [2] 汪琳琳,方凤满,蒋炳言.中国菜地土壤和蔬菜重金属污染研究进展[J].吉林农业科学,2009,34(2):61-64.
- [3] Uraguchi S, Moil S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2677-2688.
- [4] 朱智伟,陈铭学,牟仁祥,等.水稻镉代谢与控制研究进展[J].中国农业科学,2014,47(18):3633-3640.
- [5] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. Plant Physiology, 2010, 152(4): 1796-1806.
- [6] Tanaka K, Fujimaki S, Fujiwara T, et al. Cadmium concentrations in the phloem sap of rice plants (*Oryza sativa* L.) treated with a nutrient solution containing cadmium (environment)[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2003, 49(2): 311-313.
- [7] 史静.杂交水稻对土壤Cd、Zn吸收与Cd耐性的基因型差异[D].南京:南京农业大学,2008.
- [8] 喻华,上官宇先,涂仕华,等.水稻籽粒中镉的来源[J].中国农业科学,2018,51(10):1940-1947.
- [9] 李书鼎,邓卫东,马学军,等.水稻对空气中镉的吸收[J].核农学报,1983(3):30-34.
- [10] 龙思斯,宋正国,雷鸣,等.不同外源镉对水稻生长和富集镉的影响研究[J].农业环境科学学报,2016,35(3):419-424.
- [11] 张敏.湖南攸县水稻田土壤镉污染评估与控制[D].太原:山西大学,2015.
- [12] 田阳,魏帅,魏益民,等.稻谷加工产物的镉含量及累积量分析[J].中国食品学报,2014,14(5):186-191.
- [13] 杨居荣,查燕,刘虹.污染稻、麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其存在形态初探[J].中国环境科学,1999(6):500-504.
- [14] LIU Jianguo, QIAN Min, CAI Guoliang, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1/2): 443-447.
- [15] 赵文明.种子蛋白质基因工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1995:33-37.
- [16] 王章存,康艳玲.国内外谷物蛋白发展概况[J].中国食品添加剂,2006(5):110-113.
- [17] 查燕,杨居荣,刘虹,等.污染稻麦籽实中镉和铅的分布及其存在形态[J].北京师范大学学报(自然科学版),

- 2000(2):268-273.
- [18] 冯伟,王涛,董田田,等.不同米蛋白组分与镉的结合规律[J].食品与机械,2018,34(11):4-10.
- [19] 何孟常,杨居荣.水稻籽实中蛋白质-Cd、Pb结合体及其稳定性[J].环境科学学报,2001(2):213-217.
- [20] 魏帅,田阳,郭波莉,等.稻谷加工工艺对产品镉含量的影响[J].中国食品学报,2015,15(3):146-150.
- [21] 喻凤香,林亲录,陈煦.我国主稻作区稻谷镉和铅含量及其分布特征[J].生态与农村环境学报,2013(1):24-28.
- [22] 朱剑,时南平,王红娟,等.稻米中砷汞铅镉重金属元素含量及分析[J].粮油检测与加工,2009(1):50-52.
- [23] 陆金鑫,程国强,时超,等.稻谷水热加工过程中镉迁移规律研究[J].食品安全质量检测学报,2016(6):2216-2220.
- [24] 刘晶,任佳丽,林亲录,等.大米浸泡过程中重金属迁移规律研究[J].食品与机械,2013,29(5):66-67,79.
- [25] 许艳霞,倪小英,袁毅,等.溶剂浸提技术消减稻米中镉含量[J].粮食科技与经济,2015,40(5):36-39.
- [26] Wu Y N, He R, Wang Z G, et al. A safe, efficient and simple technique for the removal of cadmium from brown rice flour with citric acid and analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Anal Methods, 2016(8): 6313-6322.
- [27] 傅亚平,廖卢艳,王巨涛,等.酸溶技术脱除大米粉中重金属镉的工艺优化[J].中国粮油学报,2017,32(3):103-109.
- [28] 田阳,魏帅,魏益民,等.大米淀粉提取工艺对淀粉产品镉含量的影响[J].中国粮油学报,2013,28(4):83-87.
- [29] 姜毅康,吴卫国.镉超标大米碱法提取淀粉的工艺条件优化[J].粮食与油脂,2017,30(2):63-67.
- [30] 傅亚平,廖卢艳,刘阳,等.乳酸菌发酵技术脱除大米粉中镉的工艺优化[J].农业工程学报,2015,3(6):319-326.
- [31] 傅亚平,吴卫国,王巨涛.乳酸菌发酵脱除大米粉中重金属镉的机理[J].食品与发酵工业,2016(3):104-108.
- [32] 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,2016,32(7):276-282.
- [33] 陈瑶,廖卢艳,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):44-49,171.
- [34] 宋娜,刘学文,曾里.酶法提取大米蛋白的研究[J].食品研究与开发,2008(8):61-64.
- [35] 黄武宁,王嘉宇,肖静.应用脱枝酶提取大米蛋白质的研究[J].食品与生物技术学报,2015,34(4):443-447.
- [36] 田阳.稻米加工技术对产品镉含量的影响[D].北京:中国农业科学院,2013.
- [37] Motaghi M, Ziarati P. Adsorptive removal of cadmium and lead from *Oryza sativa* rice by banana peel as bio-sorbent[J]. 2016, 9(2): 739-749.
- [38] Ziarati P, R azafsha A. Removal of heavy metals from *Oryza sativa* rice by sour lemon peel as bio-sorbent [J]. Biomedical & Pharmacology Journal, 2016, 9(2): 543-553.
- [39] Smith E L, Abbott A P, Ryder K S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications[J]. Chemistry Review, 2014, 114(21): 11060-11082.
- [40] Zhang Q, De Oliveira Vigier K, Royer S, et al. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(21): 7108 - 7146.
- [41] Huang Y, Feng F, Chen Z G, et al. Green and efficient removal of cadmium from rice flour using natural deep eutectic solvents [J]. Food Chem, 2018, 244: 260-265.
- [42] 黄瑶,臧园园,杨茜,等.天然低共熔溶剂对大米粉中重金属镉的去除效果及其机制[J].南京农业大学学报,2018,41(5):939-945.
- [43] Demiral H, Demiral I, Tımsek F, et al. Adsorption of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 144(2): 188-196.
- [44] Yeung A T, Gu Y Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils[J]. J. Hazard. Mater, 2011, 195: 11-29.
- [45] Yeung A T. Geochemical processes affecting electrochemical remediation//Reddy K R, Cameselle C. Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater[M]. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2009: 65-94.
- [46] 顾莹莹,付融冰,李鸿江.柠檬酸工业废水强化镉污染土壤的电化学法修复[J].化工学报,2014,65(8):3170-3177.
- [47] 杨纯.发酵工艺对大米镉含量的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2015.

(责任编辑:王丝语)