

黑木耳中不同形态的铬在 *in vitro* 系统中 生物可给性分析

李冰茹¹, 左骥民², 李杨¹, 刘静¹, 王北洪¹, 何昭颖¹, 马智宏¹

(1. 农业部农产品质量安全风险评估实验室, 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

(2. 北京市大兴区农业技术推广站, 北京 102615)

摘要: 利用 *In vitro* 系统模拟黑木耳在消化过程中不同形态的铬的生物可给性, 采用 HPLC-ICP-MS 测定不同形态铬的含量。结果表明: 29 个样品经过 *In vitro* 系统模拟消化后, 铬在胃中的生物可给性为 15.10%~35.87%; 在肠中的生物可给性为 11.02%~20.36%, 同一样品胃中的生物可给性铬大于肠中的, 且检测出的铬均以三价形态存在。可以证明在 *In vitro* 系统中, 黑木耳能有效吸附对人体有害的 Cr(VI)。对 0.5 μg/L 的 Cr(III)和 Cr(VI)混标测定 7 次, RSD 在 2.55%~4.98%之间, 方法重现性较好; 对同一样品设置 6 平行实验, 测量结果相对偏差均小于 9.5%, 说明该方法的精密度能够满足实验要求。可见, 黑木耳的生物可给性铬是对人体有益的 Cr(III), 且证明了在模拟消化过程中黑木耳能够完全吸附对人体有害的 Cr(VI), 为黑木耳中铬在消化过程中可能发生的形态转变及生物有效性提供了数据参考, 也为研究制定菌类中铬的限量标准提供参考。

关键词: *In vitro* 系统; 生物可给性; 形态; 铬; 黑木耳

文章编号: 1673-9078(2019)06-308-313

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.041

Bioaccessibility of Different Speciation of Chromium in *Auricularia auricula* during the *in Vitro* System

LI Bing-ru¹, ZUO Ji-min², LI Yang¹, LIU Jing¹, WANG Bei-hong¹, HE Zhao-ying¹, MA Zhi-hong¹

(1. Risk Assessment Lab for Agro-products, Ministry of Agriculture, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China)

(2. Beijing Daxing District Agricultural Technology Extension Station, Beijing 102615, China)

Abstract: The *in vitro* system was used to simulate the digestion of *Auricularia auricula* in stomach and intestine to analyze the bioaccessibility of chromium. The contents of chromium with different speciations were determined by HPLC-ICP-MS. The 29 samples were simulated the digestion by *in vitro* system. The bioaccessibilities of chromium in the stomach were ranged from 15.10% to 35.87%, and from 11.02% to 20.36% in the intestine. The contents of chromium in stomach were more than that in the intestine. The speciation of chromium mainly was trivalent, which proved that *Auricularia auricula* could absorb Cr(VI). The standard solutions of 0.5 μg/L Cr(III) and Cr(VI) were mixed to determined for seven times, which RSD was 2.55%~4.98%. Six parallel experiments were repeated to verify the precision of the method, which relative deviation of the results was less than 9.5%. It was put forward that the bioaccessibility of chromium in *Auricularia auricula* was Cr (III), which was benefit for the body. The *Auricularia auricula* could absorb Cr(VI) which do harm to the health. This experiment explored the change of the chromium speciation in *Auricularia auricula* during the process of digestion in stomach and intestine, which provided a reference for the study on the limit standard of the chromium in *Auricularia auricula*.

Key words: *in vitro* system; bioaccessibility; speciation; chromium; *Auricularia auricular*

收稿日期: 2019-02-17

基金项目: 北京市农林科学院创新建设项目 (KJXC20170419; KLCX20170302); 国家食品质量安全风险评估重大专项 (GJFP201900601)

作者简介: 李冰茹 (1979-), 女, 高级工程师, 研究方向: 农产品质量检测及污染评价

通讯作者: 马智宏 (1970-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农田环境有害
物质预警、农产品质量以及植物生理生化

铬被认为是一种有益于人体新陈代谢的基本微量元素^[1], 但铬的毒性及生物学作用与其存在形态密切相关^[2-4], 较高剂量的 Cr(III)反映出细胞毒性反应^[5,6]; Cr(VI)会破坏 DNA, 具有强致癌效应^[2]。由于不同铬形态的毒性差异很大^[7], 对于食品中铬含量的研究不能局限于总铬含量的测定, 分析不同形态铬的含量则更具实际意义。在人体消化过程中, 不同的消化环境

对不同形态铬的吸收、转化也不相同,因此从分析不同形态铬的生物可给性角度研究食品中的铬含量,对于确定食品中铬含量的限量值等具有科学参考价值。

生物可给性(bioaccessibility)是指污染物在胃肠环境中可以溶出的比例,表示基质中污染物能被人体吸收的相对量,也是污染物最大经口摄入的生物有效性的指示^[8,9]。重金属生物可给性的常用研究方法是体外试验法(*In vitro*)^[10],其应用较为广泛且方法相对成熟^[9-11]。体外实验法具有操作简单、实验周期短、实验条件易于控制的优势,并能够很好地拟合活体实验的效果^[8]。本文选用体外试验法模拟黑木耳的人体消化过程,分析不同形态的铬在胃和肠的生物可给性。

选择黑木耳为研究对象,主要是木耳具有食药兼用性,被人们广泛食用^[12]。同时,据农业部农产品质量风险评估工作中,连续5年对干木耳中重金属含量的监测结果,表明90%以上样品中总铬的含量超过了GB 2762-2017食品安全国家标准食品中污染物限量中蔬菜的限量值0.5 mg/kg。陈黎等对四川省3种食用菌中7种重金属含量测定表明,食用菌中铬含量最高^[13],且木耳对铬具有较强吸附性,高达113.8 mg/g^[14]。因此,对黑木耳中铬的形态及生物可给性研究具有技术指向性,而且能够通过分析不同形态铬含量变化,为更加准确地确定食品中铬的限量值提供科学参考。

本实验选择29个黑木耳样品,利用体外试验法模拟黑木耳的肠胃消化过程,并利用HPLC-ICP-MS检测其中铬的生物可给性及形态,为高铬黑木耳的健康风险评价和生物有效性提供初步参考数据。

1 实验部分

1.1 材料与设备

木耳购于北京各大超市及批发市场,袋装或散装。

胃蛋白酶(酶比活力1:2500 IU/mg)、胆盐、胰酶(酶比活力 ≥ 4 USP), Sigma公司;氯化钠、氢氧化钠、盐酸、硝酸、柠檬酸、苹果酸、冰乙酸、碳酸氢钠、EDTA二钠盐(均为分析纯),北京化工有限公司;氨水(优级纯),北京市通广精细化工公司;硝酸(优级纯),德国默克公司;Cr(III)和Cr(VI)标准溶液(1000 mg/L),北京市环境保护所;质谱调谐液,PerkinElmer公司;高纯氩气;所用水为超纯水 ≥ 18.2 M Ω .cm。

电子天平(XS205DU/220 g),梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;恒温水浴摇床(MQS-30),上海旻泉仪器有限公司;HPLC-ICP-MS(NEXION 350),德国珀金埃尔默公司;pH计(827),瑞士万通公司;超声清洗机(KQ-500),江苏昆山超声仪器公

司;粉碎机,德国艾卡集团;中扬超纯水系统。

1.2 溶液配制

60 mmol/L 硝酸铵溶液:吸取4 mL浓硝酸到1000 mL大烧杯中,加超纯水近1000 mL,混匀,加入6.4 mL浓氨水,混匀后,用稀硝酸或稀氨水调节pH至7.0。移入1000 mL容量瓶,然后用水定容。

60 mmol/L EDTA溶液:称取0.2233 g EDTA二钠,用60 mmol/L 硝酸铵溶液定容至1 L。

将Cr(III)和Cr(VI)标准溶液用60 mmol/L EDTA的溶液稀释至0.1 mg/L,作为标准储备液,然后再用流动相配成浓度为0、0.5、1、2、5、10、20 μ g/L的Cr(III)、Cr(VI)标准溶液系列,在放置60 $^{\circ}$ C的水浴中静置60 min,冷却至室温,过0.45 μ m微孔滤膜制备成标准溶液样品,上HPLC-ICP-MS测试。

配制模拟胃液2 L(含0.15 mol/L NaCl,柠檬酸1 g,苹果酸1 g,乳酸0.84 mL,冰乙酸1 mL),用6 mol/L的盐酸将pH值调为1.5,加入胃蛋白酶2.5 g。

1.3 处理方法

1.3.1 胃阶段处理

将50 mL模拟胃液和1 g粉碎的黑木耳分别加入溶出度测试仪的各反应器中,使反应器处于37 $^{\circ}$ C的恒温水浴,100 r/min匀速搅动1 h,同时通入氩气1 L/min模拟胃肠的厌氧环境。然后用针筒吸取10 mL反应液,用NaHCO₃粉末调节pH调至7,在加10 mL 60 mmol/L EDTA的溶液,在放置60 $^{\circ}$ C的水浴中静置60 min,使EDTA二钠与Cr(III)充分络合,取出冷却至室温,过0.45 μ m微孔滤膜制备成待测液I,上HPLC-ICP-MS,同时做空白试验。

1.3.2 小肠阶段处理

小肠阶段,用NaHCO₃粉末将反应液的pH调至7,将胰酶0.054 g、胆盐0.18 g加入每个反应器中,继续以1 L/min通入氩气,100 r/min转速搅动。其间,每隔约30 min测定反应液的pH值,若偏离初始值,则用浓HCl和NaHCO₃饱和溶液调节,使反应液pH值维持稳定。4 h后,吸取10 mL反应液,在加10 mL 60 mmol/L EDTA的溶液,在放置60 $^{\circ}$ C的水浴中静置60 min,使EDTA二钠与Cr(III)充分络合,取出冷却至室温,过0.45 μ m微孔滤膜制备成待测液II,上HPLC-ICP-MS,同时做空白试验。

1.3.3 Cr(VI)的添加试验

将50 mL模拟胃液和1 g粉碎的黑木耳分别加入溶出度测试仪的各反应器中,同时添加0.1 mL的1000 mg/L Cr(VI)标准液,其它同胃阶段处理和小肠阶段处

理的方法, 分别制备成对照样 I 和对照样 II。

1.3.4 总铬提取

将样品研磨后, 称样量在 0.2 g, 加 7 mL 10% 的盐酸, 在沸水浴中煮 20 min, 冷却定容至 100 mL, 以 10000 r/min 离心^[15]。吸取 10 mL 离心液, 用 NaHCO₃ 粉末调节 pH 调至 7, 在加 10 mL 60 mmol/L EDTA 的溶液, 在放置 60 °C 的水浴中静置 60 min, 使 EDTA 二钠与 Cr(III)充分络合, 取出冷却至室温, 过 0.45 μm 微孔滤膜制备成待测液样, 上 HPLC-ICP-MS, 同时做空白试验。

1.4 生物可给性

黑木耳中铬的生物可给性是指消化液中的溶解量

与木耳中总铬量的比值, 即:

生物可给性=CIV/TS×100%, CIV 为胃和肠中的溶解量, TS 为黑木耳中铬的总量^[16]。

1.5 仪器条件

色谱条件为: Hamilton PRP-X100 阴离子交换柱 (250 mm×4.6 mm, 10 μm), 流动相为 60 mmol/L 硝酸铵(pH=7.0), 流速为 1.0 mL/min, 进样量为 50 μL, 柱温 25 °C。

ICP-MS 工作参数为: RF 功率 1550 W, 载气流量 1.14 mL/min, 采用碰撞反应模式, 反应气体为 He, 氦气流量为 2.0 mL/min、Rpq 值为 0.25, 测量同位素: ⁵²Cr, 主要技术参数参见表 1。

表 1 ICP-MS 的碰撞模式下主要技术参数

Table 1 The parameters of ICP-MS with KED mode

参数	雾化流速	辅助气	等离子气	射频功率	电压	脉冲电压	阈值
参数值	1	1.2	18	1550	-1950	950	12

表 2 混标后不同形态的铬的检测结果

Table 2 The test results of different speciations of Cr

铬形态	浓度								RSD/%
Cr(III)	5.48	5.11	5.00	5.26	5.25	5.39	4.96	4.69	4.98
Cr(VI)	5.05	4.85	5.00	5.10	5.04	5.10	4.75	5.08	2.55

1.6 数据统计分析

本实验利用 WPS 表格 (10.1.0.7566) 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 精密度和准确度

表 3 实验方法的精密度检测结果

Table 3 The precision of the experimental method

Cr(III)浓度	均值/(μg/L)	相对偏差
57.51	62.30	9.51
67.69		6.47
65.74		3.43
64.03		0.75
63.48		0.98
60.86		4.94

在仪器选定的条件下工作, 对 5.00 μg/L 的 Cr(III) 和 Cr(VI)混标测定 8 次, RSD 在 2.55%~4.98%之间, 可见该方法的重现性比较好, 见表 2 所示。对同一样品的提取测定设置 6 平行, 测量结果相对偏差均在 9.51%以下, 见表 3 所示, 证明该实验方法的精密度

能满足实验要求。

2.2 胃肠中的铬生物可给性

29 个含铬木耳的总铬含量在 5.11 mg/kg~25.62 mg/kg 之间, 经过在 *In vitro* 系统处理后铬在胃中的生物可给性为 15.10%~35.87%; 在肠中的生物可给性为 11.02%~20.36%。从表 4 可以看出同一样品胃中的生物可给性铬大于肠中的, 这一规律与 Hu 等^[17]研究结论较为一致。这可能是和胃中的强酸性及酶的活性有关; 样品个体之间的差异也较大, 可能与品种的成分差异较大有关, 导致了铬的生物可给性差异。

2.3 胃阶段不同形态铬的生物可给性

对比待测液 I、对照样 I 和 0.50 μg/L 的 Cr(III) 和 Cr(VI)标准溶液色谱图, 如图 1 所示, 可以看出待测液 I 和对照样 I 色谱图上均未有 Cr(VI)峰, 对照样 I 的 Cr(III)峰高明显高于待测液 I 的峰, 说明在胃中黑木耳的生物可给性铬形态主要是 Cr(III)。对照样 I 色谱图上未出现 Cr(VI)的峰, 说明 Cr(VI)可能是被黑木耳吸附了。而对照样 I 的 Cr(III)面积大于待测液 I 的峰面积, 也可能是在酸性溶液中有还原的物质把 Cr(VI)还原了。

表 4 铬在胃和肠中的生物可给性

Table 4 The bioaccessibility of chromium in the stomach and intestines

编号	包装	总铬含量/(mg/kg)	胃中铬的生物可给性/%	肠中铬的生物可给性/%
1		5.11	27.37	20.36
2		6.43	19.68	13.13
3		6.86	18.04	11.61
4		8.72	16.42	11.56
5	散装	9.27	20.45	11.66
6		9.94	16.66	12.13
7		15.40	16.78	14.38
8		16.16	19.23	12.15
9		18.05	18.24	11.02
10		25.62	17.10	11.84

最小值		5.11	16.42	11.22
最大值		25.62	27.38	20.36
平均值		12.16	19.00	12.98

11		5.42	18.92	13.41
12		5.51	24.19	15.60
13		5.53	35.84	14.57
14		5.54	17.60	13.44
15		5.62	24.31	15.25
16		6.03	20.56	14.72
17		6.22	35.87	11.90
18		6.20	17.92	12.88
19		6.25	21.36	16.96
20	袋装	6.54	16.52	12.43
21		6.53	19.89	11.70
22		6.61	21.32	12.03
23		6.78	24.53	11.42
24		8.82	17.34	12.41
25		9.66	25.36	11.45
26		9.91	18.93	13.18
27		10.12	16.27	11.44
28		11.33	20.61	11.35
29		12.64	15.10	11.48

最小值		5.42	15.10	11.35
最大值		12.64	35.87	16.96
平均值		7.43	21.71	13.03

为了进一步证明 Cr(VI)的去向,用 pH 计实时监控对照样 I 的 pH 值,由 (1) 式可以看出当 Cr(VI)发生还原时,必须有强的还原剂,需要消耗大量的氢离子,而溶液的 pH 并无明显升高,说明 Cr(VI)已完全被黑木耳吸附了。同时对 1.4 节第 3 步 Cr(VI)的添加

试验每隔 10 min 取一次样,对比 10、20、30、40 min 的色谱图发现 40 min 的时候,溶液中的 Cr(VI)几乎不存在了,Cr(VI)的峰从 10 min 到 40 min 逐渐消失,进一步证实消化时间的延长,Cr(VI)被黑木耳吸附了。

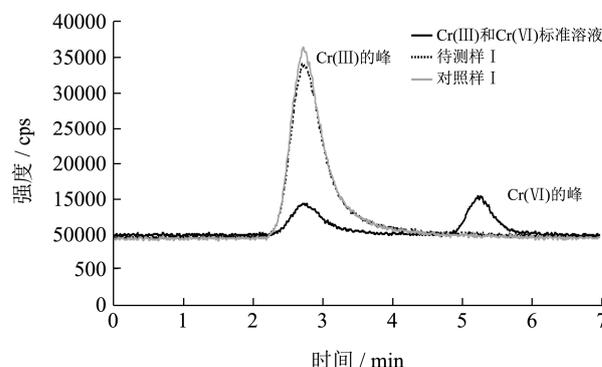


图 1 胃阶段不同形态的铬的谱图

Fig.1 Spectrogram of chromium in different speciation in the stomach

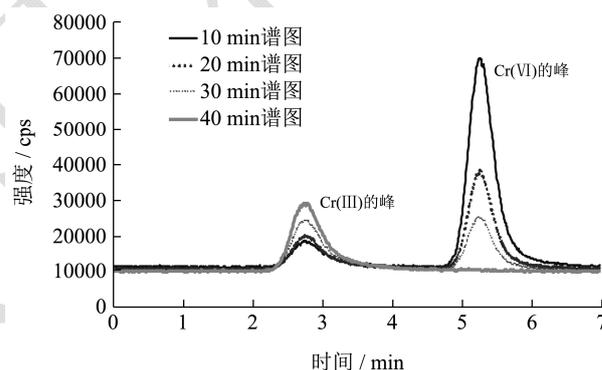


图 2 Cr(VI)被逐步吸收的谱图

Fig.2 Spectrogram of Cr(VI) absorbed gradually by Auricularia auricula

2.4 肠阶段的铬生物可给性形态

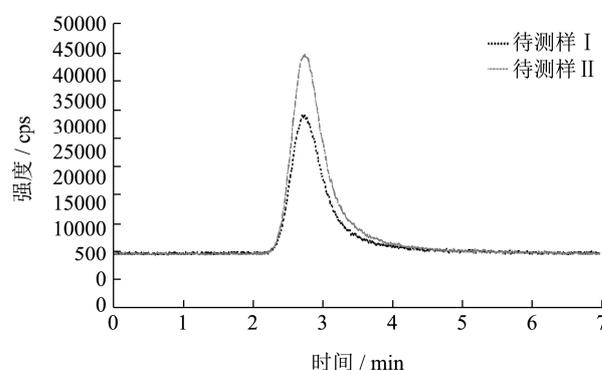


图 3 胃和肠阶段不同形态的铬的谱图

Fig.3 Spectrogram to contrast the change of chromium in the stomach and intestine

对比待测样 I 和待测样 II 的色谱图如图 3 所示,

可以看出待测样 I 和待测样 II 色谱图上只有 Cr(III) 的峰, 说明黑木耳在肠中消化, 生物可给性的铬形态均为三价的, 无 Cr(VI) 生成, 且肠中的生物可给性铬量明显低于胃中的生物可给性铬量。这可能是因为肠中的 pH 升高及酶的活性有关, 此结论与 Andrew 等^[18] 研究比较一致, Andrew 认为, 与胃阶段相比, 肠阶段生物可给性更高(Cr, U) 的现象归因于小肠中的沉淀和/或重吸收。

对比待测样 II 和对照样 II 的色谱图看 (如图 4 所示), 对照样品也未检出 Cr(VI), 说明在肠消化阶段黑木耳上吸附的 Cr(VI) 没有析出, 说明黑木耳在整个 *In vitro* 系统中具有清除 Cr(VI) 的能力。

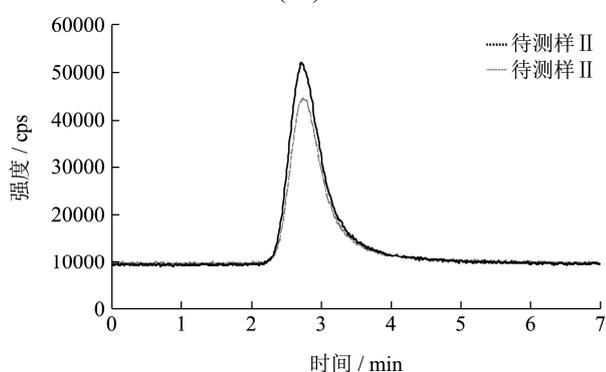


图 4 肠阶段不同形态的铬的谱图

Fig.4 Spectrogram of chromium in the intestine

3 结论

29 个含铬木耳在 *In vitro* 系统模拟经过胃和肠中消化后, 不同形态的铬在不同消化阶段的生活可给性。实验发现, 铬在胃中的生物可给性为 15.10%~35.87%; 在肠中的生物可给性为 11.02%~20.36%, 同一样品胃中的生物可给性铬大于肠中的, 且生物可给性的铬均以三价存在。对此进行了实验验证, 针对黑木耳对 Cr(VI) 的吸附性作了添加实验, 检测结果证明经过至少 40 min 的模拟消化, 在 *In vitro* 系统中黑木耳能够完全吸收对人体有害的 Cr(VI)。该实验为黑木耳中铬在消化过程中可能发生的形态转变及生物可给性提供了参考。下一步, 可以在此基础上进一步深入研究黑木耳的生物限量标准, 以及黑木耳与其他食品共同消化时铬形态的转化和吸附的作用机理等。

参考文献

[1] Michael S Bratakos, Evangelos S Lazos, Sotirios M Bratakos. Chromium content of selected Greek foods [J]. The Science of the Total Environment, 2002, 290: 47-58
 [2] Shahid M, Shamsad S, Rafiq M, et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in

soil-plant system: A review [J]. Chemosphere, 2017, 178: 513-533
 [3] Mandal B K, Vankayala R, Kumar L U. Speciation of chromium in soil and sludge in the surrounding tannery region, ranipet, tamil nadu [J]. Ism Toxicology, 2011, 4: 1-10
 [4] Hedberg Y, Gustafsson J, Karlsson H L, et al. Bioaccessibility, bioavailability and toxicity of commercially relevant iron- and chromium-based particles: in vitro studies with an inhalation perspective [J]. Particle & Fibre Toxicology, 2010, 7(1): 1-14
 [5] Owlad M, Aroua M K, Daud W A W, et al. Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: a review [J]. Water Air Soil Pollutant, 2009, 200(1-4): 59-77
 [6] 黄海燕, 蔡剑锋, 刘建军, 等. PARG 基因沉默在六价铬诱导细胞周期改变中的作用 [J]. 毒理学杂志, 2016, 3: 200-204
 HUANG Hai-yan, CAI Jian-feng, LIU Jian-jun, et al. Effect of poly (ADP-ribose) glycohydrolase silencing on cell cycle alternation in response to six valence chromium [J]. J Toxicol, 2016, 3: 200-204
 [7] 谷善勇, 骆骄阳, 刘好, 等. 铬元素及其形态分析研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(23): 4622-4631
 GU Shan-yong, LUO Jiao-yang, LIU Hao, et al. Research progress of chromium and its speciation analysis [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(23): 4622-4631
 [8] 付瑾, 崔岩山. 食物中营养物质及污染物的生物可给性研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 113-120
 FU Jin, CUI Yan-shan. Advances in bioaccessibility of nutrients and pollutants in food [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(2): 113-120
 [9] 徐笠, 陆安祥, 王纪华, 等. 食物中重金属的生物可给性和生物有效性的研究方法和应用进展 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 89-97
 XU Li, LU An-xiang, WANG Ji-hua, et al. Research methods and applications of bioaccessibility and bioavailability of heavy metals in food [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(1): 89-97
 [10] 崔岩山, 陈晓晨, 付瑾. 污染土壤中铅、砷的生物可给性研究进展 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 480-486
 CUI Yan-shan, CHEN Xiao-chen, FU Jin. Progress in study of bioaccessibility of lead and arsenic in contaminated soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 480-486
 [11] 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 等. 应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2353-2358

- YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, et al. Effects of human gut microbiota on bioaccessibility of soil Cd, Cr and Ni using SHIME model [J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2353-2358
- [12] 张俊飏,李波.对我国木耳产业发展现状与政策思考[J].华中农业大学学报(社会科学版),2012,5:14-20
ZHANU Jun-biao, LI Bo. How to develop China's edible fungi industry in a healthy way [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2012, 5: 14-20
- [13] 陈黎,江勇,王明亮,等.四川部分地区3种食用菌中7种重金属含量测定[J].中国食用菌,2009,28(2):39-42
CHEN Li, JIANG Yong, WANG Ming-liang, et al. The determination of 7 heavy metals of 3 edible fungi in part area of Sichuan province [J]. Edible Fungi of China, 2009, 28(2): 39-42
- [14] 尹宇莹,李芬芳,刘妍.毛木耳对水中铬的去除特性研究[J].环境工程,2018,35(8):57-61
YIN Yu-ying, LI Fen-fang, LIU Yan. Biosorption of CR in aqueous solutions by *Auricularia polytricha* [J]. Environmental Engineering, 2018, 35(8): 57-61
- [15] 闫美,谢晨星,朱智惠,等.保健食品中三价铬与六价铬的分离与测定[J].食品研究与开发,2016,37(7):171-175
YAN Mei, XIE Chen-xing, ZHU Zhi-hui, et al. The research on the conditions of hexavalent chromium convert to trivalent chromium in healthy food [J]. Food Research and Development, 2016, 37(7): 171-175
- [16] 付瑾,崔岩山.*In vitro* 系统评价胃肠液 pH 及土液比对铅、镉、砷生物可给性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2): 245-251
FU Jin, CUI Yan-shan. *In vitro* model system to evaluate the influence of pH and soil-gastric/intestinal juices ratio on bioaccessibility of Pb, Cd and As in two typical contaminated soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(2): 245-251
- [17] Hu J, Wu F, Wu S, et al. Bioaccessibility, dietary exposure and human risk assessment of heavy metals from market vegetables in Hong Kong revealed with an *in vitro* gastro intestinal model [J]. Chemosphere, 2013, 91(4): 455-461
- [18] Andrew Turner, Ip Ka-hei. Bioaccessibility of metals in dust from the indoor environment: Application of a physiologically based extraction test [J]. Environmental Science Technology, 2007, 41: 7851-7856

(上接第 244 页)

- [34] 宋萌.复配生物防腐剂在酱腌菜中的应用[D].天津:天津科技大学,2017
SONG Meng. The Application of compound preservative in pickles [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017
- [35] 刘愉.4种防腐剂延长低温肉制品货架期的实验研究[D].成都:电子科技大学,2007
LIU Yu. Experimental study of four preservatives on prolonging the shelf life of low temperature meat products [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007
- [36] 张立峰,宁海凤,刘玉栋,等.复配防腐剂在熏煮香肠中的应用[J].肉类工业,2017,9:43-45
ZHANG Li-feng, NING Hai-feng, LIU Yu-dong, et al. Application of compound preservatives on smoked-and-cooked sausage [J]. Meat Industry, 2017, 9: 43-45
- [37] 王思文,巩江,高昂,等.防腐剂苯甲酸钠的药理及毒理学研究[J].安徽农业科学,2010,38(30):16724,16846
WANG Si-wen, GONG Jiang, GAO Ang, et al. Pharmaco-toxicological study of preservative: Sodium benzoate [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(30): 16724, 16846

(上接第 286 页)

- [19] 范妙璇,董娇娇,王京辉,等.QuEChERS-超高效液相-三重四极杆串联质谱测定白茅根中16种真菌毒素[J].中国中药杂志,2017,42(19):3770-3775
FAN Miao-xuan, DONG Jiao-jiao, WANG Jing-hui, et al. Simultaneous determination of sixteen mycotoxins contaminants in cogon rootstalk by QuEChERS-UPLC-QqQ mass spectrometry [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(19): 3770-3775