

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20190610002

耿紫琪, 王鹏飞, 付雅祺, 等. 稻米中铬的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(6): 205-211

Geng Z Q, Wang P F, Fu Y Q, et al. Bioaccessibility of chromium in rice and its human health risk assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(6): 205-211 (in Chinese)

稻米中铬的生物可给性及其对人体的健康风险评估

耿紫琪^{1,2}, 王鹏飞¹, 付雅祺¹, 刘文菊², 崔岩山^{1,*}

1. 中国科学院大学, 北京 100049

2. 河北农业大学, 保定 071000

收稿日期: 2019-06-10 录用日期: 2019-09-08

摘要: 为了研究稻米中 Cr 的生物可给性, 并对由稻米途径摄入 Cr 所引起的人体健康风险进行评估, 从市场收集了 16 种稻米样品, 采用 *in vitro* 方法(PBET 和 SHIME 联用)研究了这些稻米样品中 Cr 在胃、小肠和结肠 3 个阶段的生物可给性及其对人体的健康风险。结果表明, 16 个稻米样品中 Cr 的含量均未超过国家食品卫生标准(GB 2762—2017)中规定的 Cr 的限量标准($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。稻米中 Cr 在胃、小肠和结肠 3 个阶段的生物可给性分别为 34.3% ~ 66.1%、46.4% ~ 89.1% 和 64.4% ~ 94.5%, 平均值为 52.5%、75.1% 和 83.0%, 小肠阶段 Cr 的生物可给性是胃阶段的 1.4 倍, 结肠阶段 Cr 的生物可给性是小肠阶段的 1.1 倍, 可见肠道微生物可以促进稻米中 Cr 的溶出释放。在人体健康风险评估中, 成人和儿童的健康风险指数危害商(HQ)均 < 1.0, 说明市场所售稻米中 Cr 对人体健康风险较小。

关键词: 铬; 稻米; 生物可给性; 人体健康风险; 体外实验

文章编号: 1673-5897(2020)6-205-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Bioaccessibility of Chromium in Rice and Its Human Health Risk Assessment

Geng Ziqi^{1,2}, Wang Pengfei¹, Fu Yaqi¹, Liu Wenju², Cui Yanshan^{1,*}

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

Received 10 June 2019 accepted 8 September 2019

Abstract: To investigate the bioaccessibility of chromium (Cr) in rice and to evaluate the human health risk of Cr due to rice intake, 16 rice samples were collected from the market. The *in vitro* method, including PBET method (physiologically based extraction test) and SHIME model (simulator of human intestinal microbial ecosystem), were used to study the Cr bioaccessibility in the gastric, small intestinal and colon phases respectively. Subsequently the human health risk of Cr was assessed. The content of Cr in the 16 rice samples did not exceed the limit standard of Cr stipulated in the National Food Hygiene Standard (GB 2762—2017) ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The bioaccessibilities of Cr in the three phases of the gastric, small intestinal and colon were 34.3% ~ 66.1%, 46.4% ~ 89.1%, and 64.4% ~ 94.5%, respectively, with the average values of 52.5%, 75.1% and 83.0%, respectively. The bioaccessibility of Cr

基金项目: 中国科学院大学生创新实践训练计划基金; 国家自然科学基金资助项目(41877501)

第一作者: 耿紫琪(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤中重金属污染健康风险评估, E-mail: gengziqui2018@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: cuiyanshan@ucas.ac.cn

in the small intestinal phase was 1.4 times higher than that in the gastric phase, and the bioaccessibility of Cr in the colon phase was 1.1 times higher than that in the small intestinal phase. Human gut microbiota can promote the rice Cr release. In human health risk assessment, the hazard quotient of adults and children were less than 1.0, indicating that Cr in sold rice may induce less risks to human health.

Keywords: Cr; rice; bioaccessibility; human health risk; *in vitro*

铬(chromium, Cr),是一种常见的重金属污染物。随着工业的发展,Cr以工业三废的形式存在于环境中的量越来越多。据统计数据显示,我国受到Cr污染的土壤已超过2 000万t^[1]。随着土壤Cr污染日益严重,由作物通过食物链进入人体的Cr逐渐蓄积,并可能对人体产生致癌效应^[2]。水稻作为我国主要的粮食作物之一,也是重金属Cr进入人体的重要途径^[3]。王晓波等^[4]调查发现广州市售大米中Cr的检出率为100%,超标率为26.67%;王国莉^[5]分析了144份惠州本地大米样品中重金属含量,其中,Cr的超标率为34.03%,可见研究稻米中Cr的生物可给性并将其用于人体健康风险评估具有十分重要的意义。

目前,在污染物对人体的健康风险评估中,主要有2种方法:(1)动物实验(*in vivo*),用来评估生物有效性;(2)体外实验(*in vitro*),用来评估生物可给性(bioaccessibility, BA)。由于动物实验存在的周期长和个体间差异等问题^[6],使得*in vitro*实验的方法受到越来越多的关注。目前,国内外对稻米中Cr的生物可给性的研究主要集中于模拟胃和小肠阶段^[7-8],但是由于结肠中存在着丰富的微生物,这些肠道微生物会影响食物中金属的代谢^[9-10],因此在食物消化过程中,进入结肠的食物残渣中的Cr同样不能被忽略。可见仅仅考虑胃和小肠阶段稻米中Cr的生物可给性,来评价人体健康风险是不够全面的。利用人体肠道微生物生态系统模拟物模型(simulator of human intestinal microbial ecosystem, SHIME)是在体外条件下模拟人体胃肠环境及微生物生态系统^[11]。目前国内外有关于运用SHIME模型探究人体肠道微生物对土壤、食物中污染物代谢的报道^[9-10,12],但是对于稻米中Cr的研究报道较少。本研究采用生物可利用性提取模型(physiologically based extraction test, PBET)方法结合SHIME模型,探究稻米中的Cr在胃、小肠和结肠3个阶段的生物可给性,并分析稻米中Cr的生物可给性的影响因子,特别是肠道微生物对Cr的代谢作用。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 稻米样品

将从中国市场上收集了16个稻米样品,按照传统的稻米煮熟方式,以米/水1:3(*m:m*)的比例蒸煮30 min^[9],将煮熟的样品冷冻干燥后,研磨过60目筛,得到的米粉一部分经微波消解仪(Mars6, CEM公司,美国)消解。消解过程如下:取0.2 g米粉于50 mL消解管中,加入5 mL浓硝酸(优级纯)、3 mL过氧化氢(优级纯)静置过夜,次日设置消解温度为80℃,缓慢加热,持续30 min,升温至120℃,保持1 h,消解完毕。转移至赶酸器中于160℃赶酸至1~2 mL左右,冷却至室温后,用超纯水定容至25 mL,过0.45 μm滤膜后,用电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)(Agilent 7500a, Thermo Fisher Scientific公司,美国)测定稻米中Cr的总量。另一部分米粉可用于*in vitro*实验研究。

1.2 *in vitro*实验

本研究结合Ruby等^[13]提出的PBET方法和SHIME模型^[12],实验包括3个连续的阶段,即胃阶段、小肠阶段和结肠阶段。实验具体操作步骤如下。

1.2.1 胃阶段

配制模拟胃液(内含柠檬酸、苹果酸、乳酸、冰乙酸和氯化钠),用浓盐酸调pH至1.5,加入胃蛋白酶。取3 g稻米粉于50 mL离心管中,加入30 mL模拟胃液摇匀后再次测pH,用盐酸调节pH在1.5左右。置于37℃、150 r·min⁻¹的恒温震荡培养箱中振荡1 h,在1 h后,吸取5 mL反应液,过0.45 μm滤膜,4℃保存待测。

1.2.2 小肠阶段

胃阶段结束后在消化液中加入NaHCO₃粉末,将消化液pH调至7.0左右,加入胰酶、胆盐,测定pH并保证其在7.0±0.1。置于37℃、150 r·min⁻¹的恒温震荡培养箱中振荡4 h,4 h后取出,吸取5 mL反应液,过0.45 μm滤膜,4℃保存待测。

1.2.3 结肠阶段

小肠阶段结束后,将小肠消化液倒入100 mL

厌氧血清瓶中,吸取 SHIME 模型降结肠中的反应液 30 mL 加入厌氧血清瓶,并迅速通入 15 ~ 20 min 氮气保证厌氧环境。置于 37 ℃、150 r·min⁻¹ 的恒温震荡培养箱中,48 h 后取出,吸取 5 mL 反应液,过 0.45 μm 滤膜,4 ℃ 保存待测。

胃、小肠和结肠阶段消化液中的 Cr 含量采用 ICP-MS 进行测定,每个样品在每个消化阶段都做 3 个平行。实验中所涉及到的试剂纯度及厂商如表 1 所示。

1.3 计算方法

1.3.1 生物可给性

稻米中 Cr 在模拟胃、小肠和结肠 3 个阶段的生物可给性可由式(1)计算。

$$BA = cV/c_s M_s \times 100\% \quad (1)$$

式中:BA 为稻米中 Cr 的生物可给性(%);c 为 *in vitro* 实验的胃、小肠或结肠阶段反应液中 Cr 的可溶态含量(mg·L⁻¹);V 为各反应器中反应液的体积(L);c_s 为稻米样品中 Cr 的含量(mg·kg⁻¹);M_s 为加入反应器中稻米样品的质量(kg)^[4]。

1.3.2 稻米中 Cr 的健康风险评估

稻米中的 Cr 每日暴露量(average daily dose, ADD)由式(2)计算。

$$ADD = c_m \times W_c \times BA / W_b \quad (2)$$

式中:c_m 为稻米样品中 Cr 的浓度(mg·kg⁻¹);W_c 是每人每天消耗的稻米总量(kg·d⁻¹);BA 是小肠阶段 Cr 的生物可给性;W_b 为成年人或儿童的平均体重

(kg)。成年男子的体重为 66.2 kg^[15],6 岁男童的体重为 23 kg^[16],成人每天稻米摄入量为 389 g·d⁻¹^[17],儿童为 277 g·d⁻¹^[18]。稻米中 Cr 的健康风险指数危害商(hazard quotient, HQ)的计算方法由式(3)计算。

$$HQ = ADD/RfD \quad (3)$$

式中:Cr 的参考剂量 RfD 为 1.5 mg·kg⁻¹·d⁻¹^[7],如果 HQ>1.0,就说明该稻米样品存在健康风险。由于人体主要的吸收器官是小肠,因而用小肠部分 Cr 生物可给性的结果来计算人体健康风险。

1.4 数据分析

采用 SPSS 24 (IBM)和 Excel 2010 软件分析数据。

2 结果 (Results)

2.1 稻米中 Cr 的含量

从市场上收集到的稻米样品中 Cr 的含量如表 2 所示,其含量范围为 0.092 ~ 0.561 mg·kg⁻¹,平均值为 0.232 mg·kg⁻¹,尚未超过国家食品卫生标准(GB2762—2017)中规定的 Cr 的限量标准(1.0 mg·kg⁻¹)^[19]。

2.2 稻米中 Cr 溶解态及其在胃、小肠和结肠 3 个阶段的生物可给性

稻米中 Cr 的溶解态含量及其生物可给性在 3 个阶段中大体呈现逐渐升高的趋势(表 2 和图 1)。模拟胃阶段 Cr 的溶解态含量范围为 0.043 ~ 0.340 mg·kg⁻¹,平均值为 0.126 mg·kg⁻¹,Cr 的生物可给性范围为 34.3% ~ 66.1%,平均值为 52.5%;模拟小肠

表 1 实验试剂及其厂商
Table 1 Experimental reagents and their manufactures

试剂 Reagent	纯度 Purity	公司 Company	试剂 Reagent	纯度 Purity	公司 Company
浓硝酸 Nitric acid	GR	北京翰隆达科技发展有限公司 Beijing Hanlonda Technology Development Co. Ltd	氯化钠 Sodium chloride	AR	国药集团化学试剂有限公司 Sinopharm Chemical Reagent Co. Ltd
过氧化氢 Hydrogen peroxide	BV-Ⅲ	北京化学试剂研究所 Beijing Institute of Chemical Reagents	浓盐酸 Hydrochloric acid	BV-Ⅲ	北京化学试剂研究所 Beijing Institute of Chemical Reagents
柠檬酸 Citric acid	AR	西陇化工股份有限公司 Xilong Chemical Co. Ltd	碳酸氢钠 Sodium bicarbonate	AR	天津市华东试剂厂 Tianjin Huadong Reagent Factory
苹果酸 Malic acid	BR	国药集团化学试剂有限公司 Sinopharm Chemical Reagent Co. Ltd	胃蛋白酶 Pepsase	—	西格玛奥德里奇贸易有限公司 Sigma-Aldrich
乳酸 Lactic acid	AR	西陇化工厂有限公司 Xilong Chemical Co. Ltd	胰酶 Pancreatin	—	西格玛奥德里奇贸易有限公司 Sigma-Aldrich
冰乙酸 Acetic acid	ACS	上海晶纯生化科技股份有限公司 Aladdin Industrial Corporation	胆盐 Cholate	—	西格玛奥德里奇贸易有限公司 Sigma-Aldrich

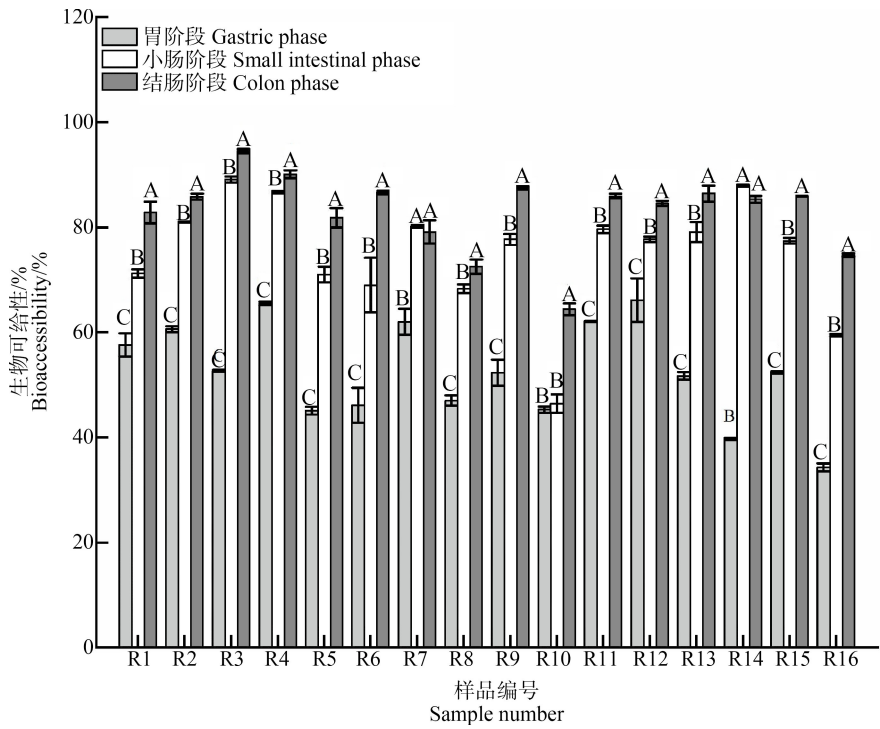


图 1 16 种稻米样品中 Cr 在胃、小肠和结肠阶段的生物可给性

注:不同字母表示同一稻米样品中 Cr 在胃、小肠和结肠阶段生物可给性差异显著($P<0.05$);图中数据为样本均值±标准偏差。

Fig. 1 Bioaccessibility of Cr in stomach, small intestine and colon of 16 rice samples

Note: The different letters means the significant differences of bioaccessibility of Cr in the gastric, small intestinal and colon phases for the rice samples ($P<0.05$); the data were expressed as sample mean±standard deviation.

表 2 稻米中 Cr 的总量以及各阶段溶解态含量

Table 2 The total concentration of Cr in rice and the dissolved concentration in each phase

编号	总量/(mg·kg ⁻¹)	胃阶段/(mg·kg ⁻¹)	小肠阶段/(mg·kg ⁻¹)	结肠阶段/(mg·kg ⁻¹)
Number	Total concentration/(mg·kg ⁻¹)	Gastric phase/(mg·kg ⁻¹)	Small intestinal phase/(mg·kg ⁻¹)	Colon phase/(mg·kg ⁻¹)
R1	0.372±0.0039	0.215±0.0058	0.265±0.0020	0.308±0.0055
R2	0.561±0.0155	0.340±0.0040	0.455±0.0004	0.481±0.0022
R3	0.229±0.0044	0.120±0.0004	0.204±0.0010	0.216±0.0007
R4	0.129±0.0049	0.084±0.0003	0.111±0.0003	0.116±0.0007
R5	0.148±0.0026	0.067±0.0008	0.105±0.0016	0.121±0.0036
R6	0.239±0.0015	0.110±0.0057	0.165±0.0154	0.207±0.0006
R7	0.293±0.0013	0.181±0.0052	0.235±0.0025	0.231±0.0046
R8	0.092±0.0060	0.043±0.0017	0.063±0.0013	0.067±0.0009
R9	0.104±0.0002	0.054±0.0018	0.081±0.0008	0.091±0.0002
R10	0.111±0.0007	0.050±0.0005	0.052±0.0014	0.072±0.0013
R11	0.240±0.0005	0.149±0.0002	0.191±0.0013	0.206±0.0008
R12	0.234±0.0044	0.155±0.0116	0.181±0.0008	0.198±0.0008
R13	0.204±0.0038	0.105±0.0025	0.161±0.0053	0.176±0.0036
R14	0.283±0.0060	0.113±0.0004	0.249±0.0005	0.242±0.0013
R15	0.323±0.0022	0.169±0.0005	0.250±0.0011	0.278±0.0001
R16	0.156±0.0001	0.053±0.0025	0.092±0.0003	0.117±0.0003
平均值 Average value	0.232	0.126	0.179	0.195

注:表中数据为样本均值±标准偏差。

Note: The data were expressed as sample mean±standard deviation.

阶段 Cr 的溶解态含量为 $0.052 \sim 0.455 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.179 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 的生物可给性范围为 $46.4\% \sim 89.1\%$, 平均值为 75.1% ; 模拟结肠阶段 Cr 的溶解态含量范围为 $0.067 \sim 0.481 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.195 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 生物可给性范围为 $64.4\% \sim 94.5\%$, 平均值为 83.0% 。由胃阶段至小肠阶段, Cr 的生物可给性上升了 1.4 倍, 由小肠阶段至结肠阶段, Cr 的生物可给性上升了 1.1 倍。

2.3 人体的健康风险评估

在考虑小肠阶段 Cr 的生物可给性和不考虑小肠阶段 Cr 生物可给性 2 种情况下, 按公式计算分析得到成人和儿童通过稻米途径摄入 Cr 的每日暴露量(ADD)以及健康风险指数危害商(HQ)(表 3)。当考虑 Cr 在小肠阶段的生物可给性时, 成人 ADD 范围为 $3.04 \times 10^{-4} \sim 2.67 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值为 $1.05 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, HQ 范围为 $2.03 \times 10^{-4} \sim 1.78 \times 10^{-3}$, 平均值为 7.00×10^{-4} ; 儿童 ADD 范围为 $6.23 \times 10^{-4} \sim 5.48 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值为 $2.15 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, HQ 范围为 $4.15 \times 10^{-4} \sim 3.65 \times 10^{-3}$, 平

均值为 1.44×10^{-3} ; 不考虑生物可给性, 成人 ADD 范围 $5.40 \times 10^{-4} \sim 3.30 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值为 $1.37 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, HQ 范围为 $3.60 \times 10^{-4} \sim 2.20 \times 10^{-3}$, 平均值为 9.10×10^{-4} ; 儿童 ADD 范围为 $8.49 \times 10^{-4} \sim 6.48 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值为 $2.22 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, HQ 范围为 $5.66 \times 10^{-4} \sim 4.32 \times 10^{-3}$, 平均值为 1.48×10^{-3} 。可见成人和儿童的 HQ 均 <1.0 , 说明稻米样品中的 Cr 对人体的健康风险较小。

3 讨论 (Discussion)

3.1 胃肠阶段稻米中 Cr 的生物可给性

本研究中小肠阶段 Cr 的生物可给性显著高于胃阶段, 是胃阶段的 1.4 倍。小肠阶段稻米中 Cr 的生物可给性高于胃阶段的原因可以从以下几个方面考虑。肠与胃环境不同, 主要是 pH 的升高和胰酶、胆盐的加入, 使得稻米中 Cr 的生物可给性改变。模拟小肠环境添加 NaHCO_3 使 pH 从 1.5 升至 7.0, HCO_3^- 浓度的增加可能会使稻米残渣对 Cr 的吸附性减弱; 在碱性介质中, Cr(III)更易于转化为 Cr(VI)^[20],

表 3 稻米中 Cr 的健康风险评估
Table 3 Health risk assessment of Cr in rice

编号 Number	考虑生物可给性 Bioaccessibility is considered				不考虑生物可给性 Bioaccessibility is not considered			
	成人 Adult		儿童 Child		成人 Adult		儿童 Child	
	ADD	HQ	ADD	HQ	ADD	HQ	ADD	HQ
R1	1.56×10^{-3}	1.04×10^{-3}	3.19×10^{-3}	2.13×10^{-3}	2.19×10^{-3}	1.46×10^{-3}	4.48×10^{-3}	2.99×10^{-3}
R2	2.67×10^{-3}	1.78×10^{-3}	5.48×10^{-3}	3.65×10^{-3}	3.30×10^{-3}	2.20×10^{-3}	6.48×10^{-3}	4.32×10^{-3}
R3	1.20×10^{-3}	7.98×10^{-4}	2.45×10^{-3}	1.64×10^{-3}	1.34×10^{-3}	8.96×10^{-4}	2.53×10^{-3}	1.69×10^{-3}
R4	6.55×10^{-4}	4.36×10^{-4}	1.34×10^{-3}	8.94×10^{-4}	7.56×10^{-4}	5.04×10^{-4}	1.37×10^{-3}	9.14×10^{-4}
R5	6.16×10^{-4}	4.10×10^{-4}	1.26×10^{-3}	8.41×10^{-4}	8.67×10^{-4}	5.78×10^{-4}	1.51×10^{-3}	1.01×10^{-3}
R6	9.69×10^{-4}	6.46×10^{-4}	1.99×10^{-3}	1.32×10^{-3}	1.41×10^{-3}	9.37×10^{-4}	2.37×10^{-3}	1.58×10^{-3}
R7	1.38×10^{-3}	9.19×10^{-4}	2.83×10^{-3}	1.88×10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.15×10^{-3}	2.79×10^{-3}	1.86×10^{-3}
R8	3.69×10^{-4}	2.46×10^{-4}	7.56×10^{-4}	5.04×10^{-4}	5.40×10^{-4}	3.60×10^{-4}	8.49×10^{-4}	5.66×10^{-4}
R9	4.77×10^{-4}	3.18×10^{-4}	9.77×10^{-4}	6.51×10^{-4}	6.14×10^{-4}	4.09×10^{-4}	9.33×10^{-4}	6.22×10^{-4}
R10	3.04×10^{-4}	2.03×10^{-4}	6.23×10^{-4}	4.15×10^{-4}	6.55×10^{-4}	4.37×10^{-4}	9.65×10^{-4}	6.43×10^{-4}
R11	1.12×10^{-3}	7.47×10^{-4}	2.30×10^{-3}	1.53×10^{-3}	1.41×10^{-3}	9.38×10^{-4}	2.01×10^{-3}	1.34×10^{-3}
R12	1.07×10^{-3}	7.12×10^{-4}	2.19×10^{-3}	1.46×10^{-3}	1.37×10^{-3}	9.16×10^{-4}	1.91×10^{-3}	1.27×10^{-3}
R13	9.47×10^{-4}	6.31×10^{-4}	1.94×10^{-3}	1.29×10^{-3}	1.20×10^{-3}	7.98×10^{-4}	1.61×10^{-3}	1.08×10^{-3}
R14	1.46×10^{-3}	9.76×10^{-4}	3.00×10^{-3}	2.00×10^{-3}	1.66×10^{-3}	1.11×10^{-3}	2.18×10^{-3}	1.45×10^{-3}
R15	1.47×10^{-3}	9.80×10^{-4}	3.01×10^{-3}	2.01×10^{-3}	1.90×10^{-3}	1.27×10^{-3}	2.42×10^{-3}	1.61×10^{-3}
R16	5.46×10^{-4}	3.64×10^{-4}	1.12×10^{-3}	7.46×10^{-4}	9.19×10^{-4}	6.13×10^{-4}	1.14×10^{-3}	7.60×10^{-4}
平均值 Average value	1.05×10^{-3}	7.00×10^{-4}	2.15×10^{-3}	1.44×10^{-3}	1.37×10^{-3}	9.10×10^{-4}	2.22×10^{-3}	1.48×10^{-3}

注: ADD 为每日暴露量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); HQ 为指数危害商。

Note: ADD is average daily dose ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); HQ is hazard quotient.

且Cr(VI)能够以溶解态在碱性溶液中较稳定存在,迁移能力较强^[21],这也可能是造成小肠阶段Cr的生物可给性高于胃阶段的原因。研究表明,人体消化道内的胃蛋白酶和胰蛋白酶水解的多肽和蛋白质的种类不同^[22],则金属元素Cr与蛋白质和多肽形成的结合态在胃和小肠中与不同条件下的稳定性存在差异,这可能造成了胃与肠阶段Cr的生物可给性不同。当然,在肠胃消化过程中存在的某些氨基酸有利于金属的溶解,当金属与消化沉积的有机质之间的结合键能量较低时,暴露在小肠环境中,经有机质吸附而被沉积下来的金属就有可能发生迁移^[23]。可见当胃肠环境中存在的某些氨基酸与Cr的亲水性较强时,可将吸附在稻米残渣中的Cr解吸下来,进入消化液中,增加小肠阶段Cr的生物可给性。因而,稻米中Cr的生物可给性在小肠阶段高于胃阶段的原因可能与pH、消化酶、稻米中蛋白质组成以及含量等多种因素有关。

3.2 结肠阶段稻米中Cr的生物可给性

结肠阶段,稻米中Cr的生物可给性为64.4%~94.5%,显著高于小肠阶段,是小肠阶段的1.1倍,这一结果说明肠道微生物可促进稻米残渣中Cr的溶出释放。本实验结果与前人的研究结果具有相同的规律。尹乃毅等的^[12]研究表明,肠道微生物可促使土壤中Cr的溶出,使得结肠阶段Cr的生物可给性高于小肠阶段。Wang等^[10]探究了结肠中微生物对蔬菜中Cr的生物可给性的影响,发现肠道微生物的作用增加了蔬菜中Cr的溶出。由于结肠中存在着丰富的微生物,且其代谢能力很强,未被消化吸收的稻米残渣进入结肠阶段后,其中的蛋白质和纤维可作为碳源和能源供肠道微生物利用^[24]。微生物在代谢稻米残渣中的有机质时,就有可能将稻米残渣上吸附的Cr释放出来进入溶液,使液相中Cr的含量增加,生物可给性增加。

3.3 稻米摄入导致Cr的人体健康风险

稻米作为我国主要的粮食作物之一,对其重金属的健康风险研究至关重要,也被学者广泛关注。有研究表明,食物是人体摄入Cr的主要来源,其贡献率最高可达98%^[25],因而,当Cr由稻米途径进入人体,并在人体内蓄积过量后所造成的严重后果不容忽视^[2],研究Cr对人体的健康风险十分必要。Li等^[7]将生物可给性的结果用于来自江苏宜丰和太仓等5个地方的70种稻米样品中Cr对人体的健康风险评估中,发现成人和儿童的HQ均远<1.0。

Praveena和Omar^[8]计算了从马来西亚市场收集的22种稻米样品中Cr的生物可给性,并对稻米中Cr的健康风险进行评估,成人的HQ为 8×10^{-4} ,儿童的HQ为 5×10^{-3} ,二者均<1.0,表明稻米样品中Cr对人体的健康影响较小。Omar等^[26]评估了马来西亚雪兰莪州稻米中Cr的健康风险,发现所收集的22种稻米样品中的Cr不存在对人体的潜在健康风险。在本研究中,对于从中国市场收集的16种稻米样品,利用*in vitro*实验方法评估了稻米样品中Cr对人体的健康风险。针对成人和儿童,在考虑和不考虑生物可给性2种情况下,成人和儿童的HQ均<1.0,表明这16种稻米的摄入不会引起人体健康风险,与前人的研究结果一致。

通讯作者简介:崔岩山(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为重金属污染控制及其对人体健康风险。

参考文献(References):

- [1] 王爱云,钟国锋,徐刚标,等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1717-1725
Wang A Y, Zhong G F, Xu G B, et al. Effects of Cr(VI) stress on physiological characteristics of *Brassica juncea* and its Cr uptake [J]. Environmental Science, 2011, 32(6): 1717-1725 (in Chinese)
- [2] 刘晓娟,程滨,赵瑞芬,等. 铬在环境中的迁移行为及毒害研究进展[J]. 山西农业科学, 2018, 46(6): 1061-1064
Liu X J, Cheng B, Zhao R F, et al. Research progress on chromium transport in environment and poisoning [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(6): 1061-1064 (in Chinese)
- [3] 高岐, 窦宪民. 韶关地区土壤-水稻体系铬含量研究及其相关性分析[J]. 河北农业科学, 2010, 14(3): 74-75
Gao Q, Dou X M. Analysis on chromium contents of soil-rice system and their correlation in Shaoguan [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(3): 74-75 (in Chinese)
- [4] 王晓波,李建国,刘冬英,等. 广州市市售大米中铬污染水平及健康风险评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(1): 75-78
Wang X B, Li J G, Liu D Y, et al. Evaluation on chromium contamination in rice to human health in Guangzhou City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(1): 75-78 (in Chinese)
- [5] 王国莉. 商品大米中Cd、Pb、Cr的污染状况及健康风险评估[J]. 基因组学与应用生物学, 2012, 31(3): 295-

- 302
Wang G L. Evaluation of the pollution and health risk caused by Cd, Pb and Cr in rice samples from open markets [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2012, 31 (3): 295-302 (in Chinese)
- [6] 尹乃毅, 崔岩山, 张震南, 等. 土壤中金属的生物可给性及其动态变化的研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 317-325
Yin N Y, Cui Y S, Zhang Z N, et al. Bioaccessibility and dynamic dissolution of metals in contaminated soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 317-325 (in Chinese)
- [7] Li T Y, Song Y X, Yuan X Y, et al. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessment of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.): A probabilistic-based analysis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5683-5690
- [8] Praveena S M, Omar N A. Heavy metal exposure from cooked rice grain ingestion and its potential health risks to humans from total and bioavailable forms analysis [J]. *Food Chemistry*, 2017, 235: 203-211
- [9] Sun G X, van de Wiele T, Alava P, et al. Arsenic in cooked rice: Effect of chemical, enzymatic and microbial processes on bioaccessibility and speciation in the human gastrointestinal tract [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 241-246
- [10] Wang P F, Yin N Y, Cai X L, et al. Variability of chromium bioaccessibility and speciation in vegetables: The influence of *in vitro* methods, gut microbiota and vegetable species [J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 347-352
- [11] van de Wiele T R, Verstraete W, Siciliano S D. Polycyclic aromatic hydrocarbon release from a soil matrix in the *in vitro* gastrointestinal tract [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(4): 1343-1353
- [12] 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 N Y, Du H L, Zhang Z N, 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 (in Chinese)
- [13] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(21): 3697-3705
- [14] 徐笠, 刘洋, 杨婧婧, 等. 利用体外实验方法评估稻米中镉的生物可给性和健康风险[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(5): 219-226
Xu L, Liu Y, Yang J J, et al. Bioaccessibility of cadmium in rice and its health risk assessment by *in vitro* method [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(5): 219-226 (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 中国居民营养与慢性病状况报告[R]. 北京: 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 2015
- [16] 中华人民共和国国家体育总局. 2014 年国民体质监测公报[EB/OL]. (2015-11-25) [2019-03-18]. <http://www.sport.gov.cn/n16/n1077/n1227/7328132.html>
- [17] 王陇德. 2002 综合报告 中国居民营养与健康状况调查报告之一[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 19-32
- [18] Xu L, Lu A X, Wang J H, et al. Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 214-220
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 中华人民共和国国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- [20] Eary L E, Davis A. Geochemistry of an acidic chromium sulfate plume [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22 (2): 357-369
- [21] 尹华, 王锋, 刘文. 重金属铬在水环境中的迁移转化规律及其污染防治措施[J]. *农业与技术*, 2010, 30(5): 47-49
- [22] 沈同, 王镜岩, 赵邦佛. 生物化学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 258-260
- [23] Kalman J, Turner A. An evaluation of metal bioaccessibility in estuarine sediments using the commercially available protein, bovine serum albumin [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107(4): 486-497
- [24] 孙长豹, 刘志静, 刘飞, 等. 食物成分对肠道菌群结构的影响[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(9): 178-182
Sun C B, Liu Z J, Liu F, et al. Impact of dietary components on gut microbiota structure [J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(9): 178-182 (in Chinese)
- [25] 陈志蓉, 张庆生. 六价铬的危害性评价及其检测回顾[J]. *中国药事*, 2012, 26(7): 683-688
Chen Z R, Zhang Q S. The risk assessment and detection review of hexavalent chromium [J]. *Chinese Pharmaceutical Affairs*, 2012, 26(7): 683-688 (in Chinese)
- [26] Omar N A, Praveena S M, Aris A Z, et al. Health risk assessment using *in vitro* digestion model in assessing bioavailability of heavy metal in rice: A preliminary study [J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 46-50 ◆