

北京市售大米重金属含量监测及膳食风险评估

魏军晓¹, 耿元波², 岑况¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

(2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 监测市售大米重金属含量, 为北京市食品安全风险评估提供参考和数据支撑, 采集了市售大米样品 537 件, 分析其 9 种重金属(Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn)含量。采用内梅罗综合污染指数法评价市售大米的重金属污染水平; 采用健康风险评估模型进行食用安全评估。结果如下: 大米 Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn 含量平均值分别为 0.02、0.02、2.27、2.63、9.10、0.15、0.07、0.17 和 14.27 mg/kg。大米重金属污染程度依次为: Pb>Zn>Ni>Cu>Cd>Cr, 其风险等级依次为: Cu>Zn>Cd>Pb>Cr>Ni。结果表明, 大米重金属的内梅罗综合污染指数较低, 表明当前北京市售大米整体状况较好、处于安全水平; 大米重金属对儿童的 THQ 贡献率高于成人, 相关部门应加强有毒重金属监督与相应膳食指导。

关键词: 北京市; 大米; 重金属; 健康风险评估

文章编号: 1673-9078(2018)06-267-273

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.6.037

The Heavy Metal Content Monitoring and Dietary Risk Assessment of Commercial Rice in Beijing

WEI Jun-xiao¹, GENG Yuan-bo², CEN Kuang¹

(1.School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

(2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: A total of 537 rice grain samples commercially available in the market of Beijing were collected to monitor the content of heavy metals such as Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr and Zn, providing data support and reference for food safety and health risk assessment in Beijing. The heavy metal pollution evaluation and health risk assessment were conducted using Nemerow comprehensive pollution index and health risk assessment model, respectively. The results were as follows: the average content of Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr and Zn were 0.02, 0.03, 2.27, 2.63, 9.10, 0.15, 0.07, 0.17 and 14.27 mg/kg, respectively. The pollution grades of heavy metal pollution in rice were as follows: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > Cr and the risk grades were as follows: Cu > Zn > Cd > Pb > Cr > Ni. The results showed that the Nemerow pollution index of heavy metals in the rice was low, which indicated that the overall health status of rice in Beijing was at a safe level. The contribution of rice heavy metals to children's THQ was higher than that of adults. Therefore, we suggest that the relevant department should improve the supervision on harmful heavy metals and offer better dietary guidance.

Key words: Beijing; rice; heavy metal; health risk assessment

据统计, 全球约有 75% 的人以稻米作为主食^[1], 水稻在我国是第一大粮食作物^[2], 我国稻谷总产量也排名世界第一^[3]。大米中含有丰富的人体必需营养素和矿物质, 但由于水稻特殊的生长习性加之工业发展和经济的增长所带来的环境污染, 许多稻田受到了不同程度的自然和人为因素污染^[4], 同时, 由于水体和土壤污染的食物链传输, 大米籽实重金属污染也

收稿日期: 2018-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071138); 科技部十三五国家重点研发项目(2016YFD0201208)

作者简介: 魏军晓(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向: 环境地球化学

通讯作者: 岑况(1953-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 环境地球化学

时有发生, 大米重金属超标已成为全球问题, 一直是研究的热点^[5-8]。我国部分地区的大米重金属超标问题也十分严重^[2,3,7,9-12], 2002 年农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对全国市场稻米进行了安全性抽查, 结果显示, 稻米中超标最严重的重金属是 Pb, 超标率为 28.4%, 其次是 Cd, 超标率 10.3%。甄燕红等^[13]的研究指出, 10% 左右的市售大米 Cd 含量超标, 70% 的大米潜存 Cd 食物暴露风险问题。由此可见, 大米中重金属含量的风险监测至关重要, 监测任务对于了解大米重金属污染具有重要意义。

当前, 有关我国大米重金属含量分析与健康风险评估的研究很多, 主要涉及广东和湖南(尤其是矿区研

究)^[3,9,14]、贵州^[10]、四川^[15]、江西^[16]、宁夏^[17]、云南^[18]、上海^[19]和天津^[20]等地,而有关北京市售大米重金属含量分析则缺乏较系统的研究。

北京是一座拥有 2172.9 万人口的大都市,据市场调研,北京市大米年销售量占到了成品粮总销售量的 60%以上,当前北京市售大米约 80%来自东北三省,15%来自安徽和江苏,5%来自天津和唐山。虽然出现过《京城大米抽样 5 类重金属均未超标》的报道,但也存在北京市售大米重金属超标的研究^[21];而有关北京市售大米重金属含量也缺乏系统研究与食用安全性评价。因此,监测北京市售大米重金属含量,既为食品安全评价提供依据,同时又为健康风险评估提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品与仪器

样品采集于北京市超市销售的大米样品,考虑到样品的代表性,所采集区域包括东城区、西城区、海淀区、朝阳区、石景山区、昌平区、房山区、大兴区、顺义区和通州区等 10 个区内超市所售大米 537 件。样品采集后先用自来水冲洗 1 遍,再用二次蒸馏水冲洗 2 遍,然后放置于烘箱中 80 °C 条件下烘干,粉碎后将其放入塑料自封袋中备用。

样品消解则参照国家标准,所用试剂均为优级纯,超纯水均由 Mili-Q 超纯水器(美国 Milipore 公司)制得,所用玻璃器皿均由 5%的硝酸浸泡过夜。采用石墨炉原子吸收光谱仪(澳大利亚 GBC 公司,GF5000 型 GF-AAS)测定 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Pb;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Agilent 公司,5100 型 ICP-OES)测定 Fe、Mn、Sr 和 Zn。实验过程采用国家标准物质 GBW 10044 (四川大米)和 GBW 10045 (湖南大米)进行质量控制,每批次样品均有空白对照。

1.2 大米重金属污染评价方法

内梅罗综合污染指数已广泛应用于土壤重金属污染评价。目前,该方法已应用于大米重金属污染评价^[22,23],其中单项污染指数 P_i 计算方法具体如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为重金属 i 的污染指数, C_i 为大米中重金属 i 的实测值, S_i 为大米中重金属 i 的评价标准。当 $P_i \leq 1$ 时,表示大米未受污染; $P_i > 1$ 时,表示大米受到污染^[24]。

综合污染指数计算方法具体如下:

$$P_s = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\min}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_s 为综合污染指数; P_{\max} 为单项污染指数最大值; P_{\min} 为单项污染指数 P_i 的平均值。综合污染指数 P_s 分 5 个污染等级, ≤ 0.7 为安全等级, ≤ 1.0 为警戒限, ≤ 2.0 为轻污染, ≤ 3.0 为中污染, > 3.0 为重污染^[24]。

1.3 健康风险评估方法

重金属日均摄入量(daily intake, DI),即衡量居民经大米途径的重金属日摄入量,其计算方法具体如下:

$$DI = C_{hm} \times W_{rice} \quad (3)$$

其中, C_{hm} 表示大米中的重金属含量(mg/kg), W_{rice} 表示大米的日均摄入量(g/d)^[24]。

健康风险评估模型采用目标危险系数(target hazard quotient, THQ)进行评价,THQ 计算模型表示如下:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times W_{rice} \times C_{hm}}{RfDo \times B_w \times AT_n} \quad (4)$$

其中,EF 为暴露频率(以 365 d/a 计);ED 为暴露年限或期望寿命(a),以 70 a 计;RfDo 代表口服参考剂量[mg/(kg·d)],Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的口服参考剂量(RfD)分别为 0.001、0.003、0.04、0.02、0.004 和 0.3 mg/(kg·d); B_w 表示人群的平均身体质量(kg),成人和儿童的体重分别以 56 和 33 kg 计,成年男性和女性的体重分别以 63 和 54 kg 计; AT_n 为非致癌源的平均暴露时间($ED \times 365$ d/a)^[24,25]。

由于重金属对人体的危害一般是多种重金属综合作用的结果,因此,采用总目标危险系数(TTHQ)对大米中重金属元素的危害进行评价,计算公式如下:

$$TTHQ = \sum_{i=1}^n THQ_i \quad (5)$$

式中: THQ_i 为第 i 种重金属元素的目标危险系数, $TTHQ < 1$ 表明没有负面影响; $TTHQ > 1$ 表明对人体健康产生负面影响的可能性很大; $TTHQ > 10$ 表明存在慢性毒性效应^[24]。

1.4 数据统计分析

数据统计分析主要采用 SPSS 22,包括对大米重金属含量进行单样本 t 检验(包括均值,95%置信区间等)、相关性分析和因子分析等。

2 结果与分析

2.1 大米重金属含量统计分析

本研究分析的大米重金属含量见表 1,参考 GB 2762-2017 和 NY 861-2004 中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的限量,本研究大米中 Cd、Cr、Cu 和 Zn 均未超标,Pb 超标样品 8 件,超标率 1.49%。Ni 的限量参考傅逸根等的研究结果^[26],则 2 件样品超标,超标率为

0.37%。9种元素的变异程度为Cr≈Cd≈Pb>Ni≈Fe>Mn 同大米样品间的Cd、Cr和Pb含量较为离散。
≈Sr>Cu≈Zn, Cd、Cr和Pb的变异系数较大,表明不

表1 大米重金属含量

Table 1 Heavy metal content of rice

元素	均值	范围 mg/kg	95%置信区间	变异系数/%	超标率/%
Cr ^a	0.02	0~0.15	0.02~0.03	97.2	0
Cu ^b	2.27	1.07~3.96	2.17~2.35	12.8	0
Fe ^c	2.63	0.05~97.1	2.43~2.98	51.7	-
Mn ^d	9.10	4.82~16.59	8.70~9.57	27.5	-
Ni ^e	0.15	0.01~0.42	0.13~0.16	59.8	0.37
Sr	0.17	0.09~0.37	0.16~0.17	26.5	-
Zn ^f	14.27	9.00~20.49	13.92~14.57	13.4	0
Cd ^g	0.02	0~0.13	0.02~0.03	95.7	0
Pb ^h	0.07	0.02~0.32	0.06~0.08	92.6	1.49

注:消解方法参考 a: GB 5009.123-2014; b: GB 5009.13-2017; c: GB/T 5009.90-2003; d: GB 5009.242-2017; e: GB 5009.138-2017; f: 5009.14-2003; g: GB 5009.15-2014; h: GB 5009.12-2017。采用GF-AAS测定Cd、Cr、Cu、Ni和Pb的含量;采用ICP-OES测定Fe、Mn、Sr和Zn的含量。

2.1.1 大米重金属含量相关性分析

表2为大米中9种重金属含量相关性分析,其中Cd和Cu、Mn、Zn, Cu和Ni、Zn, Fe和Pb, Mn和Zn, Ni和Pb、Zn之间均存在较强的正相关;Cr和Mn之间则存在较强的负相关。Sr仅与Fe存在0.05水平上的相关,其余元素均与至少2个及以上的元素

达到相关或极显著正相关。这可能与元素之间的协同或颞颞作用有关,例如实验证明Cd和Cu, Cd和Zn之间具有颞颞作用,则Cd与Cd/Cu以及Cd与Cd/Zn的线性相关系数(R^2)和Pearson相关系数分别为0.9303、0.9630和0.316、0.397,且Cd与Cu以及Cd与Zn之间均存在0.01水平上显著相关。

表2 大米重金属元素含量间的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix among heavy metal element content in rice

元素	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
Cd	1.000								
Cr	-0.169	1.000							
Cu	0.316**	0.195*	1.000						
Fe	0.218*	0.236*	-0.011	1.000					
Mn	0.450**	-0.320**	0.089	0.124	1.000				
Ni	0.277*	-0.010	0.278**	0.236*	0.208*	1.000			
Pb	0.314*	0.055	-0.004	0.471**	0.207*	0.524**	1.000		
Sr	0.017	0.004	-0.045	0.309**	0.084	-0.100	0.004	1.000	
Zn	0.397**	0.158	0.385**	0.198*	0.338**	0.426**	0.381**	-0.156	1.000

注: ** $p \leq 0.01$; * $p \leq 0.05$ 。

2.1.2 大米重金属含量因子分析

因子分析即将多个变量简化为较少变量的降维分析。主成分分析的公因子方差提取率为59.6%~90.0%,符合主成分分析的前提要求;如果按绝对值为0.5衡量载荷的话,则表3中加粗字体对应元素为3个主成

分中的主要载荷,第1主成分和第2主成分的累积贡献率较高为57.61%,主要载荷元素有Cd(0.767)、Cu(0.835)、Ni(0.550)、Zn(0.631)、Cr(0.832)、Fe(0.801)和Pb(0.727)。第3主成分的贡献率为12.99%,其中载荷较高的元素为Mn(0.634)和Sr(0.854)。

表3 大米中金属元素最大方差旋转成分矩阵

Table 3 The maximum variance rotation composition matrix of metal elements in rice

元素	公因子方差提取率/%	第1主成分	第2主成分	第3主成分
Cd	79.6	0.767	0.144	0.011
Cr	78.8	-0.293	0.832	-0.089
Cu	71.1	0.835	-0.049	0.068
Fe	73.9	0.296	0.801	0.084
Mn	69.0	0.463	-0.200	0.634
Ni	65.3	0.550	0.354	-0.451
Pb	69.4	0.173	0.727	-0.265
Sr	73.4	-0.063	0.010	0.854
Zn	70.0	0.631	0.548	0.034
提取方差贡献率/%	-	34.73	22.88	12.99
提取方差累积贡献率/%	-	34.73	57.61	70.60

2.2 大米重金属污染评价

本研究涉及 Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn 等 9 种元素, 由于国家标准中并未规定大米 Fe、Mn 和 Sr 等的限量, 本研究仅对 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 6 种重金属进行污染评价。参考 GB 2762-2017 和 FAO/WHO 食品法典委员会标准^[24], 并通过(1)和(2)式计算得出, 大米中 6 种重金属含量水平如下: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > Cr, 其综合污染指数为 0.31, 该值小于 0.7, 表明所研究大米总体处于安全水平。

2.3 大米重金属摄入风险评估

北京市居民大米日消费量以 73.8 g/d 计^[27], 则通过大米途径摄入 Cd、Pb、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Sr、Zn 含量分别为 0.0015、0.0019、0.1674、0.1944、0.6717、0.0109、0.0048、0.0123 和 1.0532 mg/(人·d)[由(3)式算得]。由(4)式得出 6 种重金属的 THQ 值及其贡献率(表 4), Cu 和 Zn 的 THQ 贡献率较大, 其次是 Cd 和 Pb。另外, 6 种重金属的 THQ 值均表现为儿童高于成人、成年女性高于成年男性, 表明合理的膳食结构对于预防不同年龄和性别的重金属摄入风险至关重要。

另外, 由于 Cd 和 Pb 的 THQ 贡献率仅低于 Cu 和 Zn, 因此长期食用大米可能带来的 Cd 和 Pb 危害仍不容忽视。

测定结果与国家标准对比可知, 大米中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 均未超标, 但仍需结合北京市居民的大米膳食情况做更深层次的风险评价。每日允许摄入量(allowable daily intake, ADI)是指, 每日摄入化学物质对健康无任何已知不良效应的剂量。据鲍善芬等^[27], 大米膳食摄入量占膳食总量的 6.83%, 基于北京市居

民的大米膳食占比, 同时考虑其它食物引起的重金属摄入, 则对于北京市售大米 Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn 的含量分别超过 0.21、0.45、6.40、100.10、26.26、1.02、0.22、1.10 和 19.05 mg/kg 即为超标。

表4 大米重金属的 THQ 值及贡献率

Table 4 THQ value and contribution rate of heavy metals in

元 素	rice grains				THQ 贡献率
	THQ 值				
	成人	成年男性	成年女性	儿童	贡献率
Cd	0.0263	0.0234	0.0273	0.0447	12.78
Cr	0.0110	0.0098	0.0115	0.0187	5.36
Cu	0.0747	0.0664	0.0775	0.1268	36.28
Ni	0.0097	0.0086	0.0101	0.0165	4.71
Pb	0.0215	0.0191	0.0223	0.0365	10.4
Zn	0.0627	0.0557	0.0650	0.1064	30.43

注: THQ 和 TTHQ 分别由(4)和(5)式计算得出。

参考大米摄入途径的 Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn 的日均重金属摄入量和文献^[28-30]中重金属的 ADI 值, 可得出北京市居民通过大米途径摄入重金属的 ADI 值贡献率(表 5), 9 种重金属的人均 ADI 值贡献率依次为 Mn>Zn>Cu>Cd。

关于食品中 Cu 和 Zn 的限量问题, 卫生部和国家标准化委员会已于 2011 年发布公告, 决定废止《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-91)和《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199-94)等 3 项国家标准^[24], 引起了较大争议, 因为虽然 Cu 和 Zn 是人体必需微量元素, 但摄入过量的 Cu 和 Zn 同样会危害人体健康^[31]。因此, 重金属风险监测项目不仅包括有毒重金属, 也应包含人体必需微量元素(例如 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Sr 和 Zn), 其摄入不足或过量均会影响人体健康。

表5 大米中重金属的ADI值贡献率

Table 5 ADI value contribution rate of heavy metals in rice

元素	ADI 值/mg/(人·d)		ADI 值贡献率/%
	文献[30]	其他	
Cd	-	0.06 ^[28]	5.83 ^c
Pb	-	0.214 ^[28]	5.75 ^c
Cr ^e	0.0275 ^a 0.0310 ^b	0.2-0.5 ^[28]	2.25-0.9 ^c
Cu ^f	0.6 ^a 0.8 ^b	2 ^g	20.07 ^c
Fe ^f	15 ^a 13.8 ^b	15 ^g	3.11 ^c
Mn ^e	3.5 ^a 4.5 ^b	-	46.03 ^{ad} 35.8 ^{bd}
Ni	-	1.2 ^[28]	2.17 ^c
Sr	-	1.9 ^[32]	1.56 ^c
Zn ^f	8.7 ^a 12.3(男) ^b 7.7(女) ^b	15 ^g	29.03 ^{ad} 20.53 ^{bd} 32.80 ^{bd}

注: a 代表儿童, b 代表成年人; c 代表由其他文献中的数据计算得出的大米重金属 ADI 值贡献率, ad 和 bd 代表 RNI(推荐摄入量)或 AI(适宜摄入量)计算得出的 ADI 贡献值; e 代表 AI, f 代表 RNI; g 数据源自 FAO/WHO 食品法典委员会标准^[24]。

无论是检测结果与国家标准对比, 还是基于居民膳食占比的大米重金属风险评估, 都表明当前北京市售大米重金属总体较为安全, 这与北京大米市场“商户准入、商品准入和监督管理”以及“对大米的监测年年都开展, 其中重金属和农药残留等属常规检测项目是每年必检”的政府行为是分不开的。

3 结论

本文采用石墨炉原子吸收光谱(GF-AAS)法和电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法检测了北京市售大米中的 9 种重金属含量, 其中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Pb 的测定采用 GF-AAS 法, Fe、Mn、Sr 和 Zn 采用 ICP-OES 法。市售大米 Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr 和 Zn 含量平均值分别为 0.02、0.03、2.27、2.63、9.10、0.15、0.07、0.17 和 14.27 mg/kg。结果表明, 北京市售大米受 Pb 和 Zn 污染程度较高, 但仍处于安全水平; Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 6 种重金属的综合污染指数为 0.31<0.7, 表明所研究大米总体处于安全水平; Cu 和 Zn 的 THQ 值与 ADI 值贡献率均较大, THQ 贡献率表现为儿童高于成人、成年女性高于男性, 建议加强有毒重金属监督与相应膳食指导; 从国家标准限量对比和膳食占比 2 方面分析了市售大米重金属含量和膳食风险评估, 认为当前北京市售大

米重金属整体处于安全水平, 但长期食用大米摄入 Cd 和 Pb 的健康风险仍不容忽视。

参考文献

- [1] Naseer R, Sultana B, Khan M Z, et al. Utilization of waste fruit-peels to inhibit aflatoxins synthesis by *Aspergillus flavus*: A biotreatment of rice for safer storage [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172: 423-428
- [2] 张良运, 李恋卿, 潘根兴. 南方典型产地大米 Cd、Zn、Se 含量变异及其健康风险探讨[J]. *环境科学*, 2009, 30(9): 2792-2797
ZHANG Liang-yun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Variation of Cd, Zn and Se contents of polished rice and the potential health risk for subsistence-diet farmers from typical areas of South China [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2792-2797
- [3] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2314-2320
LEI Ming, ZENG Min, WANG Li-hong, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2314-2320
- [4] Douay F, Roussel H, Fourrier H, et al. Investigation of heavy metal concentrations on urban soils, dust and vegetables nearby a former smelter site in mortagne du nord, Northern France [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7 (3): 143-146
- [5] Das H K, Mitra A K, Sengupta P K, et al. Arsenic concentrations in rice, vegetables, and fish in Bangladesh a preliminary study [J]. *Environment International*, 2003, 30: 383-387
- [6] Tsukahar T, Ezaki T, Moriguchi J, et al. Rice as the most influential source of cadmium intake among general Japanese population [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 305: 41-51
- [7] Zhuang P, McBride M B, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 1551-1561
- [8] Singh A, Sharma R K, Agrawal M, et al. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of food stuffs from the waste water irrigated site of a dry tropical area of India [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(2): 611-619

- [9] 杨菲,白卢哲,梁春穗,等.2009年广东省市售大米及其制品镉污染状况调查[J].中国食品卫生杂志,2011,23(4):358-362
YANG Fei, BAI Lu-xi, LIANG Chun-sui, et al. Investigation of cadmium contamination on retailed rice and rice products in Guangdong province in 2009 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2011, 23(4): 358-362
- [10] 吴迪,杨秀珍,李存雄,等.贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水中重金属含量及健康风险评估[J].农业环境科学学报,2013,32(10):1992-1998
WU Di, YANG Xiu-zhen, LI Cun-xiong, et al. Concentrations and health assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 1992-1998
- [11] Wanlu L, Binbin X, Qiujin S, et al. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 407-420
- [12] 詹珍洁,陈建业,管克.温州市瓯海区市售大米中铅、镉、汞污染状况及健康风险评估[J].中国卫生检验杂志,2016,26(6):875-879
ZHAN Zhen-jie, CHEN Jian-ye, GUAN Ke. Research on the contamination status of lead, cadmium and mercury in market-sold rice and its health risk evaluation in Ou-hai district of Wenzhou [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2016, 26(6): 875-879
- [13] 甄燕红,成颜君,潘根兴,等.中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J].安全与环境学报,2008,8(1):119-122
ZHEN Yan-hong, CHENG Yan-jun, PAN Gen-xing, et al. Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(1): 119-122
- [14] 邹梦遥,张磊,周遗品,等.某铅锌矿周边地区大米重金属污染评价及膳食暴露风险评估[J].广东农业科学,2015,42(16):64-70
ZOU Meng-yao, ZHANG Lei, ZHOU Yi-pin, et al. Pollution evaluation and dietary exposure risk assessment of heavy metals in rice from a lead-zinc ore mine [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(16): 64-70
- [15] 金立新,侯青叶,包雨函,等.德阳镉污染农田区生态安全性及居民健康风险评估[J].现代地质,2008,22(6):984-989
JIN Li-xin, HOU Qing-ye, BAO Yu-han, et al. Ecological security and residents health risk assessment on polluted farmland by cadmium in Deyang region [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 984-989
- [16] 尚琪,翟苗苗,姚量三,等.江西省某县大米镉污染情况追踪调查[J].卫生研究,2009,38(3):296-298
SHANG Qi, ZHAI Miao-miao, YAO Liang-san, et al. A following up survey on cadmium level in rice in contaminated area, Jiangxi Province [J]. Journal of Hygiene Research, 2009, 38(3): 296-298
- [17] 李国振,贾健斌,付亭亭,等.宁夏可追溯大米土壤重金属(铅、砷、汞、镉)的本底分布情况及含量评价[J].食品科技,2014,39(10):7-10
LI Guo-zhen, JIA Jian-bin, FU Ting-ting, et al. Study of heavy metal (lead, arsenic, cadmium, mercury) background distribution and content analysis in soil of the traceable rice in Ningxia [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(10): 7-10
- [18] 林昕,黎其万,杜丽娟,等.云南省大米中重金属镉含量及其健康风险评估[J].食品安全质量检测学报,2016,7(9):3841-3847
LIN Xin, LI Qi-wan, DU Li-juan, et al. Content determination and health risk assessment of cadmium in rice in Yunnan province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(9): 3841-3847
- [19] 潘静娴,毛洪斌,张艳,等.上海市场上几种有机大米相关品质特性研究[J].中国食物与营养,2010,12:10-13
PAN Jing-xian, MAO Hong-bin, ZHANG Yan, et al. Related quality characters of several kinds of organic rice from Shanghai market [J]. Food and Nutrition in China, 2010, 12: 10-13
- [20] 陈秋生,殷萍,张强,等.大米重金属含量及其食用的健康风险分析[J].食品工业,2016,37(9):194-197
CHEN Qiu-sheng, YIN Ping, ZHANG Qiang, et al. Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in rice [J]. The Food Industry, 2016, 37(9): 194-197
- [21] 金文军,芦丹.2011年北京市昌平区市售农产品中的重金属含量调查[J].职业与健康,2012,28(24):3029-3031
JIN Wen-jun, LU Dan. Investigation of heavy metal contents in agricultural products in Changping District of Beijing in 2011 [J]. Occupation and Health, 2012, 28(24): 3029-3031
- [22] 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 Guo-li. Evaluation of 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
- [23] 黄楚珊,胡国成,陈棉彪,等.矿区家庭谷物和豆类重金属含量特征及风险评估[J].中国环境科学,2017,37(3):1171-1178

- HUANG Chu-shan, HU Guo-cheng, CHEN Mian-biao, et al. Heavy metal content characteristics and risk assessment of household cereal and beans from mining areas [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1171-1178
- [24] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等.典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J].*环境科学*,2013,34(3):1076-1085
- LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetables plots from a typical nonferrous metals mine city [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 1076-1085
- [25] 陈同斌,宋波,郑袁明,等.北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J].*中国农业科学*,2006,39(8):1589-1597
- CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1589-1597
- [26] 傅逸根,胡欣,俞苏霞.食品中镍限量卫生标准的研究[J].*浙江省医学科学院学报*,1999,37:9-11
- FU Yi-gen, HU Xin, YU Su-xia. Study on the tolerance limit of nickel in foods [J]. *Journal of Zhejiang Academy of Medical Sciences*, 1999, 37: 9-11
- [27] 鲍善芬,赵霖,李珍,等.北京地区居民膳食调查[J].*中国食物与营养*,2007,2:7-11
- BAO Shan-fen, ZHAO Lin, LI Zhen, et al. Dietary survey of residents in Beijing [J]. *Food and Nutrition in China*, 2007, 2: 7-11
- [28] 李晓燕,陈同斌,谭勇壁,等.北京市小麦籽粒的重金属含量及其健康风险分析[J].*地理研究*,2008,27(6):1340-1346
- LI Xiao-yan, CHEN Tong-bin, TAN Yong-bi, et al. Concentrations and risk of heavy metals in grain of wheat grown in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1340-1346
- [29] Llorent-Martínez E J, Ortega-Barrales P, Córdova M L F, et al. Investigation by ICP-MS of trace element levels in vegetable edible oils produced in Spain [J]. *Food Chemistry*, 2011, 127: 1257-1262
- [30] 中国营养学会.中国居民膳食指南 2016[M].北京:人民卫生出版社,2016
- Chinese Nutrition Society. Chinese residents dietary guidelines 2016 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016
- [31] Goldhaber S B. Trace element risk assessment essentiality vs. toxicity [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2003, 38(2): 232-242
- [32] Alina K P, Arun B M. Trace Elements from Soil to Human [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007