

网络出版时间:2016-10-20 16:36 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.12.014
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161020.1636.028.html>

福建闽西矿区周边稻米重金属含量及健康风险评估

刘兰英^{1,2}, 涂杰峰^{1,2}, 邱伟兴³, 陈卫伟^{1,2},
陈 静³, 伍云卿^{1,2}, 黄振才³, 薛德乾³

(1 福建省农业科学院 农业质量标准与检测技术研究所, 福建 福州 350003; 2 福建省精密仪器农业测试重点实验室,
福建 福州 350003; 3 上杭县农业局 农产品质量检验检测站, 福建 龙岩 364000)

【摘要】【目的】研究福建闽西矿区周边稻米的重金属污染状况,并对其进行健康风险进行评价。【方法】以福建闽西矿区周边种植的水稻为研究对象,采用石墨炉原子吸收光谱法测定稻米中 Cd、Pb、Cr 3 种重金属含量,通过单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价稻米中 3 种重金属的污染状况,利用 Monte-Carlo 概率模型法评估稻米中 3 种重金属的健康风险,并探讨了稻米重金属与土壤重金属含量之间的相关性。【结果】研究区稻米存在不同程度的 Cd、Pb、Cr 含量超标现象,稻米中各元素的单因子污染指数平均值大小顺序为 Pb>Cd>Cr,稻米重金属综合污染指数平均值为 1.89,研究区稻米整体处于轻度污染等级。食用研究区稻米有对人体健康造成危害的可能性,不同元素对人体健康风险的大小顺序为 Cd>Pb>Cr。相关性分析表明,水稻对重金属元素 Cd、Cr 的积累与其对应土壤中重金属含量有一定的关系,并受其共存元素的影响。【结论】福建闽西矿区周边种植的稻米已被重金属污染,且对人体健康造成了一定风险。

【关键词】 稻米;重金属;污染;矿区;健康风险评估

【中图分类号】 S511;X503.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)12-0099-08

Contents and health risk assessment of heavy metals in rice in mining area of western Fujian

LIU Lanying^{1,2}, TU Jiefeng^{1,2}, QIU Weixing³, CHEN Weiwei^{1,2},
CHEN Jing³, WU Yunqing^{1,2}, HUANG Zhencai³, XUE Deqian³

(1 Institute for Agricultural Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou, Fujian 350003, China;
2 Key Laboratory for Precision Instrument Tests in Agricultural Fields, Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350003,
China; 3 Testing & Inspection Center for Agricultural Products Quality, Agricultural Bureau of
Shanghang County, Longyan, Fujian 364000, China)

Abstract: 【Objective】The study investigated heavy metal pollution of rice around a mining area in western Fujian and evaluated the health risk. 【Method】Contents of three heavy metals, Cd, Pb and Cr, in rice planted in mining affected areas in western Fujian were measured using graphite furnace atomic absorption spectrometer. Rice pollution status was evaluated with the combination of single pollution index and Nemerow pollution index, and health risks were assessed using probability assessment model Monte-Carlo. The correlation between contents of heavy metals in rice and soils was also investigated. 【Result】Rice in the study area was contaminated by Cd, Pb and Cr at different levels. The average single pollution indexes of heavy metals in rice were in order of Pb>Cd>Cr. The complex pollution index of heavy metals was

〔收稿日期〕 2016-06-21

〔基金项目〕 福建省科技计划项目(2014R1025-1, 2015R1025-9)

〔作者简介〕 刘兰英(1987—),女,福建平潭人,研究实习员,硕士,主要从事农产品与土壤重金属污染研究。
E-mail: lly87119@126.com

〔通信作者〕 涂杰峰(1960—),男,福建明溪人,副研究员,硕士生导师,主要从事农产品与土壤重金属污染研究。
E-mail: tujiefeng@hotmail.com

1.89, implying light pollution level. The assessment indicated that there was a probability of health risk by ingesting rice in the study area and the health risks were in order of $Cd > Pb > Cr$. Contents of Cd and Cr in rice had correlation with those in soils, and influenced by the coexistence of elements. 【Conclusion】 The rice cultivated in mining affected areas was polluted by heavy metals, and there was potential health effects to human.

Key words: rice; heavy metal; contamination; mining area; health risk assessment

水稻是我国三大主要粮食品种之一, 稻米在我国南方居民的膳食结构中占有重要地位^[1]。近年来, 由于工业化和城市化的发展, 工业促进经济发展的同时也对周边的生态环境造成了污染, 其中重金属污染就比较严重^[2]。2013 年湖南“镉米”事件将稻米重金属污染的严重性摆在了公众面前^[3], 食用被重金属污染的稻米成为毒害人体的一条途径。因此, 分析稻米中的重金属含量并评价其健康风险, 已成为研究的热点之一。

目前已有关于稻米重金属含量及其健康风险评估的一些报道。Wang 等^[4] 研究报道, 广东韶关市大宝山矿周边蔬菜和稻米中的镉含量分别高出限量标准的 7 倍和 5 倍。Ji 等^[5] 在韩国高城郡某一矿区周边调查发现, 当地作物对重金属暴露的主要贡献来源于稻米。Satpathy 等^[6] 基于印度东海岸周边稻米中重金属残留的监测数据对当地稻米重金属污染进行了风险评估, 发现通过食用稻米途径, 该地区居民存在重金属过量积累的风险。然而, 上述研究多采用点评估法对稻米重金属污染进行健康风险评价, 结果比较粗糙且缺乏代表性。近年来, 基于 Monte-Carlo 模拟的概率模型正逐渐应用于农产品重金属污染风险评估研究中^[7-8]。该模型主要通过计算机多次运算, 采用随机抽样的方式, 从重金属含量数据中抽取随机数据来模拟个体的暴露量^[9], 拟合出的风险更能表征实际情况。

闽西矿产资源丰富, 属福建省为数不多的有色和贵金属重要矿产地。矿产开发促进了当地的工农业与经济发展, 但相关行业排放的工业“三废”也导致矿产周边的农田受到了不同程度的重金属污染。污染农田中的重金属元素向作物地上部分的转移, 给居民的健康带来了不同程度的威胁。本研究选用福建闽西矿区周边种植的水稻为对象, 测定籽粒中的 Cd、Pb 和 Cr 含量, 分析稻米重金属污染状况, 通过概率模型对居民摄食该区域稻米导致的健康风险进行评价, 并探讨了稻米和土壤重金属含量之间的相关性, 以期全面了解矿区周边居民通过水稻暴露于重金属的总体状况, 为评价稻米质量和控制重金

属污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于福建的闽西, 年均气温 20 ℃, 年降水量 1 500 mm 左右, 矿产资源相对丰富, 且种类较多, 主要有金、铜、铁、锰、铀、钼、铅、锌、稀土、石灰石、白云岩等矿种, 矿区多为山地, 地势不平坦, 农田分布散乱。

1.2 样品采集

按照研究区域水稻的分布情况, 于 2015 年水稻收获季节, 分别选定矿区周边 25 个村庄(记为 S1~S25)进行布点采样(图 1)。

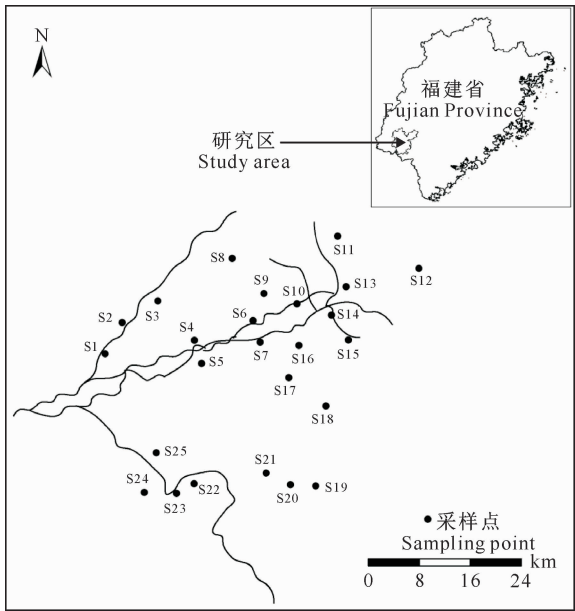


图 1 福建闽西矿区周边 25 个采样点位置示意图
Fig. 1 Location of 25 sampling sites in mining area of western Fujian

在每个村庄选取播种面积 3.33 hm² 以上的稻田 4~5 块, 依据梅花形取样方法, 将每块稻田分割成 5 小块, 然后在分割后的小田块中取 5 个点, 每点取代表性水稻 2 株, 共 50 株混合为 1 个稻谷样品, 每份稻谷样品量保证干燥后籽粒总量在 1 kg 以上, 最后共采集稻谷样品 103 份, 同时记录采样点的地

理地质状况。在采集水稻样品的同时采集对应土壤样品,采样深度为 0~20 cm。

1.3 样品的处理与测定

稻谷样品经脱壳机(JLG-II,成都粮食仪器厂)脱壳、精米机(SDJ-100,杭州汇尔仪器公司)脱糠后,用粉碎机(JSFM-I,成都粮食仪器厂)研磨成粉末并贮存于干净塑封袋中备用。稻米样品重金属(Cd、Pb、Cr) 全量消解过程参照国标 GB/T 5009. 15—2003 中的湿式消解法(HNO₃-H₂O₂) 进行,土壤样品重金属(Cd、Pb、Cr) 全量消解过程参照国标GB/T 17141—1997 中的湿式消解法(HCl-HNO₃-HF-HClO₄) 进行,用石墨炉原子吸收光谱仪(GF-AAS, PinAAcle 900Z)测定溶液中的重金属离子含量。整个分析过程所用到的试剂均为优级纯,所用水均为去离子水,分析过程中每个样品均设平行双样,以国家标准物质 GBW 10044 和 GBW 07427 进行测定质量控制,且回收率为 90%~111%。

1.4 稻米重金属污染评价

采用单因子污染指数法分别对研究区稻米中 Cd、Pb、Cr 的污染状况进行评价,同时使用内梅罗综合污染指数法对研究区稻米中单一采样点的 Cd、Pb、Cr 污染状况进行综合性评价,具体计算公式如下^[10-11]:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 表示稻米中重金属 i 的单因子污染指数, C_i 为重金属 i 的实测含量,mg/kg; S_i 为重金属 i 的限量标准值,mg/kg。当 $P_i \geq 1$ 时,说明稻米被重金属污染;当 $P_i < 1$ 时,说明稻米未受到重金属污染。

$$P_{com} = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\ave}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: P_{com} 表示稻米重金属的综合污染指数, P_{imax} 为重金属 i 的最大单因子污染指数, P_{iave} 为各重金属单因子污染指数的平均值。重金属综合污染指数评价标准见表 1。

表 1 重金属综合污染指数评价标准的分级

Table 1 Evaluation classification criteria of comprehensive pollution indexes of heavy metals

等级 Rank	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染程度 Degree of pollution
I	≤0.7	安全 Safe
II	0.7<~≤1	警戒 Critical precaution
III	1<~≤2	轻度 Slight
IV	2<~≤3	中度 Moderate
V	>3	重度 Serious

1.5 稻米重金属健康风险评估

采用基于 Monte-Carlo 模拟的概率模型,评估研究区稻米中 Cd、Pb、Cr 对人体引起的健康风险。暴露评估与风险表征参照美国环境保护署(USEPA)发布的化学污染物健康风险评估模型,具体如下:

$$CDI = \frac{Cf \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365} \tag{3}$$

式中: CDI 表示某一重金属元素的日均暴露量,mg/(kg·d); Cf 为稻米中重金属的实测含量,mg/kg; IR 为稻米日摄入量,取 0.337 kg/d^[12]; EF 为暴露频率,350 d/年; ED 为暴露年限,取 70 年; BW 为体质量,取 60 kg; AT 为平均接触时间,取 70 d^[13]。

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \tag{4}$$

式中: HQ 表示风险商; RfD 为参考暴露剂量,mg/(kg·d),本研究中稻米 Cd、Pb、Cr 的 RfD 分别为 0.001,0.003 5,0.003 0 mg/(kg·d)。当 $HQ < 1$ 时,说明研究区稻米中的重金属对人体健康未产生危害;当 $HQ \geq 1$ 时,说明研究区稻米中的重金属可引起人体健康风险,且 HQ 值越大,表明该重金属对人体健康造成的风险越大。在风险评估过程中,通常采用 HQ 的平均值、中位数、以及 95%,97.5% 和 99.5% 高暴露位点作为指标进行分析^[14]。

1.6 数据分析与统计

利用 Excel 2003、Origin 9.0 和 SPSS 16.0 软件进行数据的分析与统计,通过 ArcGIS 10.2 软件制作稻米采样分布示意图。

2 结果与分析

2.1 稻米重金属含量特征

对研究区采集的每份水稻籽粒样品分别进行 Cd、Pb、Cr 含量测定,通过描述性统计分析 3 种重金属元素在稻米中的分布情况,结果见图 2。从图 2 可知,研究区水稻籽粒中重金属 Cd、Pb、Cr 含量数据经对数转换后均符合正态分布规律,说明本研究区域获得的稻米重金属数据具有统计学意义。依据国家《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2012)对稻米重金属进行评价,各重金属元素的限量值分别为: Cd ≤ 0.2 mg/kg, Pb ≤ 0.2 mg/kg, Cr ≤ 1.0 mg/kg。

研究区稻米 Cd 含量为 0.004~1.142 mg/kg, 平均含量 0.179 mg/kg,最大值约为最小值的 286

倍;Pb 含量为 0. 043 ~ 2. 585 mg/kg, 平均含量 0. 411 mg/kg, 最大值约为最小值的 60 倍;Cr 含量为 0. 018 ~ 5. 393 mg/kg, 平均含量 0. 512 mg/kg, 最大值约为最小值的 300 倍。与国家《食品中污染物

限量标准》(GB 2762—2012)比较来看,研究区稻米中 Cd 和 Cr 的平均含量均低于国家食品中污染物限量标准,但 Pb 的平均含量是国家标准值的 2. 06 倍,暗示研究区稻米 Pb 含量超标现象最为严重。

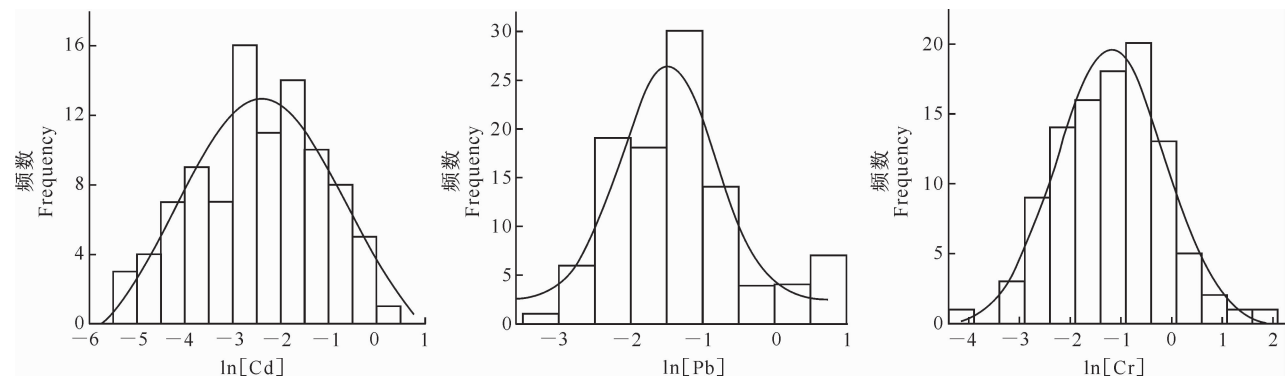
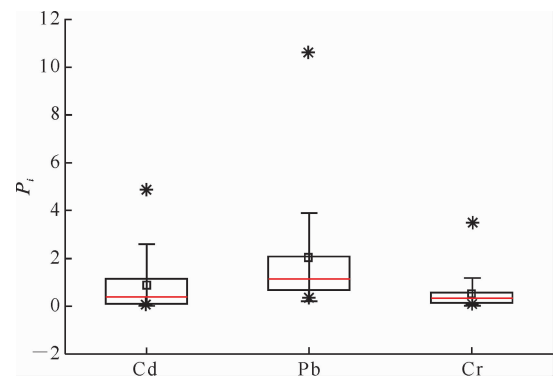


图 2 福建闽西矿区周边稻米重金属含量分布特征

Fig. 2 Frequency distribution of heavy metals contents in rice in mining area of western Fujian

2.2 稻米重金属污染评价

为了进一步明确研究区稻米受重金属 Cd、Pb、Cr 污染状况,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对稻米中重金属的污染水平进行评价,结果见图 3 及表 2。



箱形图(不含点)中 5 条横线从上到下依次为 90%分位数、75%分位数、中位数、25%分位数和 10%分位数。
星号表示异常值,正方形空心方点表示平均值
Box plot (exclude point) from top to bottom shows 90%, 75%, median, 25% and 10% percentage values, respectively.
Asterisk means outliers and square point means average

图 3 福建闽西矿区周边稻米重金属的单因子污染指数
Fig. 3 Single pollution indexes of heavy metals in rice in mining area of western Fujian

由图 3 可以看出,研究区水稻籽粒中各重金属元素的单因子污染指数平均值高低顺序为 Pb>Cd>Cr。依据单因子污染指数(P_i)是否大于 1 为划分标准可知,研究区稻米中有 64 个样品的 Pb 单因子污染指数大于 1,最高 P_i 值达到 10. 6,说明这 64 个稻米样品已经受到 Pb 污染;有 30 个样品的 Cd 单因子污染指数大于 1,最高 P_i 值达到 5. 7,说明这 30 个稻米样品已经受到 Cd 污染;有 11 个样品的 Cr 单因子污染指数大于 1,最高 P_i 值达到 3. 5,说明研究区有 11 个稻米样品已经受到 Cr 污染。可见研究区稻米中 Pb 的 P_i 很高,其为主要污染因子;其次是 Cd 和 Cr。

从内梅罗综合污染指数(表 2)来看,研究区稻米大部分样品处于轻度及以上等级污染,其中轻度、中度和重度污染稻米样品分别占样本总数的 37. 9%, 9. 7%和 16. 5%;此外,有 25. 2%和 10. 7%稻米的样品属于安全和警戒线等级。通过计算获得研究区稻米重金属的综合污染指数(P_{com})的平均值为 1. 89,可知研究区稻米整体处于重金属轻度污染等级。由此可见,整个研究区部分地区的稻米已经受到了 Cd、Pb 和 Cr 的污染,该研究区的稻米质量应当引起重视。

表 2 福建闽西矿区周边稻米重金属综合污染评价

Table 2 Comprehensive pollution assessment of heavy metals in rice in mining area of western Fujian

指标 Index	$P_{com} \leq 0.7$	$0.7 < P_{com} \leq 1$	$1 < P_{com} \leq 2$	$2 < P_{com} \leq 3$	$P_{com} > 3$
污染程度 Pollution degree	安全 Safe	警戒 Critical precaution	轻度 Slight	中度 Moderate	重度 Serious
频数 Frequency	26	11	39	10	17
比例/% Rate	25. 2	10. 7	37. 9	9. 7	16. 5

2.3 稻米重金属健康风险评估

为了进一步明确研究区受重金属 Cd、Pb 和 Cr 污染的稻米是否给居民健康带来风险,本研究应用基于 Monte-Carlo 模拟的概率模型评估稻米中 3 种重金属元素对于人体的健康风险,结果列于图 4 和表 3。从表 3 可以看出,3 种重金属元素风险商 HQ 的平均值与中位数均小于 1,但其在 95%,97.5%和 99.5%高暴露位点上的值均大于 1,说明食用研究

区稻米有对人体健康可能构成威胁。各重金属元素 HQ 的平均值与中位数及在 95%,97.5%和 99.5%高暴露位点上的 HQ 值由大到小依次为 $Cd>Pb>Cr$,结合风险商模拟结果(图 4)可知,研究区稻米中 Cd、Pb 和 Cr 3 种元素的风险商 HQ 值大于 1 的概率分别为 12.5%,9.8%和 6.4%,说明通过食用稻米途径摄入的 Cd 元素对人体健康造成危害的可能性最大,其次是 Pb 和 Cr。

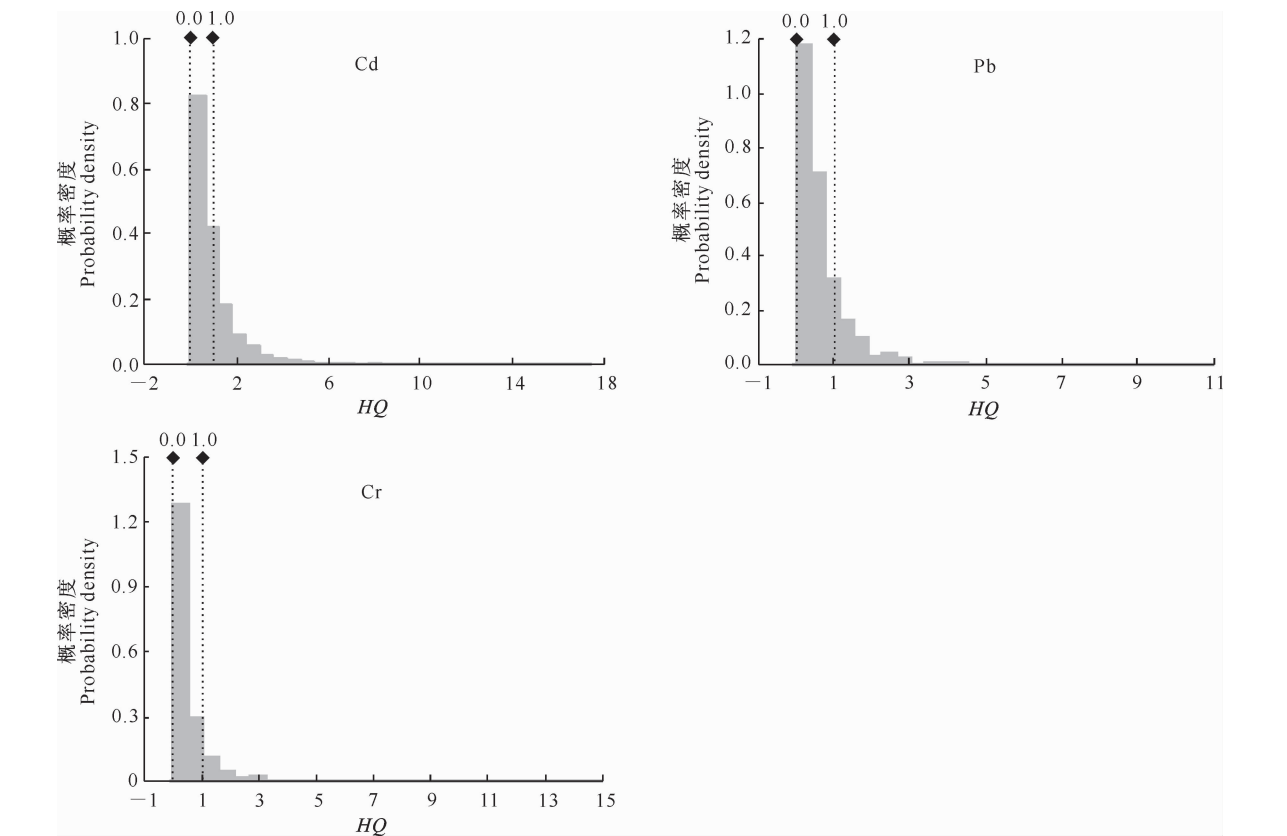


图 4 福建闽西矿区周边稻米重金属对人体健康风险的概率密度

Fig. 4 Probability density of health risk caused by heavy metals in rice in mining area of western Fujian

表 3 福建闽西矿区周边稻米重金属健康风险统计

元素 Element	风险商 Risk threshold(HQ)				
	平均值 Average	中位数 Median	95%暴露位点 95% exposure	97.5%暴露位点 97.5% exposure	99.5%暴露位点 99.5% exposure
Cd	0.997	0.632	3.33	4.52	8.26
Pb	0.697	0.440	2.09	2.97	6.36
Cr	0.603	0.304	2.07	2.83	5.48

2.4 稻米与土壤中重金属的相关性

采用统计学软件进一步分析研究区水稻籽粒中 Cd、Pb、Cr 含量平均值与其对应采样点的土壤中 Cd、Pb、Cr 含量平均值(表 4)之间的相关性,结果如表 5 所示。表 4 显示,研究区稻田土壤重金属(Cd、Pb、Cr)均存在一定程度的超标,Cd 和 Pb 为主要污染因子,其中 Cd 超标现象最为严重。从表 5 可以看

出,稻米中重金属 Cd 与 Cr,稻米中 Cd、Cr 与土壤中 Pb 之间均存在极显著正相关性($P<0.01$);稻米中 Cd 与土壤中 Cd 之间呈显著正相关性($P<0.05$),说明它们的变化趋势具有一定的一致性,它们之间存在复合污染或同源污染,这与 Rafiq 等^[15]、郑宏艳等^[16]的研究结果类似。另外,稻米中 Cr、Cd 与土壤中 Cr 之间呈现显著负相关性,而稻米中 Pb 和土壤

中各重金属元素之间没有显著的相关性。

表 4 福建闽西矿区周边稻田土壤重金属含量统计结果

Table 4 Statistical results of heavy metals in soils in mining area of western Fujian					
元素 Element	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average	标准差/(mg·kg ⁻¹) Standard deviation	超标率/% Over standard rate
Cd	0.089	3.670	0.366	0.448	20
Pb	43.200	486.000	138.000	95.800	14
Cr	7.450	366.000	65.500	68.700	3

表 5 福建闽西矿区周边稻米与土壤重金属相关关系

Table 5 Correlations between the contents of heavy metals in rice and soils in mining area of western Fujian							
样品 Sample	指标 Index	稻米 Rice			土壤 Soil		
		Cd	Pb	Cr	Cd	Pb	Cr
稻米 Rice	Cd	1	0.127	0.328**	0.233*	0.402**	-0.210*
	Pb		1	-0.012	-0.106	-0.006	-0.167
	Cr			1	-0.014	0.299**	-0.202*
土壤 Soil	Cd				1	0.616**	0.096
	Pb					1	-0.126
	Cr						1

注：* * 表示极显著相关($P<0.01$), * 表示显著相关($P<0.05$)。
Note: * * indicates highly significant correlation ($P<0.01$), * indicates significant correlation ($P<0.05$).

3 讨 论

本研究采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价了福建闽西矿区周边稻米重金属的污染状况,结果表明,矿区周边稻米 Cd、Pb 和 Cr 含量均不同程度地超过国家《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2012),整体处于轻度污染等级,研究区稻米的主要污染因子是 Pb 和 Cd。此结果与相关研究对于矿区及周边种植的农作物污染情况相类似,例如 Zhuang 等^[17]调查了广东大宝山矿区种植的稻米和蔬菜中重金属污染状况,表明稻米和蔬菜中 Pb、Cd 含量均超过国家食品限量标准。杨胜香等^[18]对湘西花垣矿区种植的蔬菜重金属含量调查发现,矿区所有蔬菜 Pb、Cd 含量均超过国家蔬菜限量标准,Pb、Cd 元素对当地蔬菜造成了严重污染。矿区周边种植的农作物重金属污染严重可能是由于:一方面矿区大多属山地,采矿时留下的矿渣通过雨水从矿山上冲下汇入农田,导致农田里的重金属大量累积;另一方面与农作物自身吸收大气污染中漂浮的重金属有关。可见,在矿区及周边种植农作物,其重金属污染现象比较严重,应当引起相关部门的足够重视。

总体来看,本研究对稻米健康风险评估的结果与污染指数评价的结果基本一致,即研究区稻米受到了 Cd、Pb 和 Cr 元素的复合污染,对人体健康存在风险。但 2 种分析结果也存在一些差异,即各重金属元素的健康风险排序和污染指数排序有所差

别。健康风险评估结果显示不同元素的健康风险为 Cd>Pb>Cr,而污染指数评价结果显示不同元素的污染高低顺序为 Pb>Cd>Cr。这种差异性可能是由于健康风险评估和污染指数评价中所采用的评价标准或评价指标不同所致。另外,本研究中稻米 Pb 元素超标极其严重,而风险评估结果表明该元素对人体健康造成危害的概率仅为 9.8%。可见,受某一重金属污染的作物是否会对人体健康产生危害,不能仅凭借该重金属元素是否超标作出评价,还应该结合健康风险评估结果进行判定。建议我国在制定 Pb 含量标准时应考虑到其对健康的影响,在不影响人体健康的前提下适度放宽食品中 Pb 的标准规定限量范围。

本研究相关性分析结果表明,水稻对 Cd、Cr 元素的积累与其对应土壤中重金属含量有一定的关系,并受其共存元素的影响。可见,土壤中的重金属元素会通过根系迁移至水稻籽粒中,从而影响稻米对重金属的积累,此结果与吴迪等^[19]关于贵州铅锌矿区土壤和水稻中重金属污染的研究结果类似。另外,本研究中稻米 Pb 元素超标最为严重,而稻米中 Pb 与土壤中各重金属元素之间没有显著相关性,这一现象可能是由于研究区存在其他新的污染源,导致稻米受到 Pb 污染。本研究调查发现,稻田、稻米中 Cd 含量超标的采样点主要分布在村 7、村 8、村 10、村 14、村 15 和村 21,Cr 含量超标的采样点主要分布在村 14、村 21 和村 25,Pb 含量超标的采样点主要分布在村 14、村 15、村 19、村 21 和村 25。可

见,村 14 和村 21 均受到了不同程度的 Cd、Pb、Cr 污染,这可能是由于村 14 和村 21 距离矿区更近,矿产开发过程排出的废气、废水和废渣集中造成的。通过采样时所记录的各采样点的地理地质状况发现,在已搬迁的电子厂附近及公路旁所采集的稻米样品中 Pb 元素超标现象极其严重。这可能与电子工业排放的废气、废水有关,虽然电子厂目前已搬迁,但当时遗留下来的大量污染物则很难彻底清除;另外,交通运输过程排放的尾气中含有大量的 Pb 化合物^[20],烟尘微粒飘浮在空气中,导致种植在公路两侧的水稻受到了 Pb 污染。

本研究采用基于 Monte-Carlo 模拟的概率模型对研究区稻米 Cd、Pb 和 Cr 元素所引起的健康风险进行了评价,避免了传统计算方法所带来的代表性不足、不确定性等问题。但研究中稻米重金属的暴露途径仅考虑了食用途径,其他如呼吸、皮肤接触等途径在本研究中并未涉及,使得健康风险评估结果并不全面。另外,由于国内在健康风险评估方面的研究仍处于起步阶段,尚未对暴露调查和暴露参数等建立有效的基础数据库^[21-22],因此本研究模型中的暴露参数参考了美国环境保护署(USEPA)推荐的暴露因子数据,这样也不可避免地给评估结果带来了一些不确定性,这方面以后还需要进一步的完善。

[参考文献]

- [1] 刘笑然,兰敦臣,李 越. 2014 年中国稻米产业研究 [J]. 中国粮食经济,2014(12):31.
Liu X R, Lan D C, Li Y. Research of rice industry in 2004, China [J]. China Grain Economy, 2014(12):31.
- [2] 王学刚,王光辉,刘金生. 矿区重金属污染土壤的修复技术研究现状 [J]. 工业安全与环保,2010,36(4):29-31.
Wang X G, Wang G H, Liu J S. Study on mining area's heavy-metal soil pollution remediation technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(4):29-31.
- [3] 李国庆. 从广东“镉大米”事件看我国粮食质量安全的监管 [J]. 河南工业大学学报(社会科学版),2013(3):6.
Li G Q. On Chinese supervision of grain quality safety from “cadmium rice” event in Guangdong [J]. Journal of Henan University of Technology (Social Science Edition), 2013(3):6.
- [4] Wang Z X, Hu X B, Xu Z C, et al. Cadmium in agricultural soils, vegetables and rice and potential health risk in vicinity of Dabaoshan Mine in Shaoguan, China [J]. Journal of Central South University, 2014(21):2004-2010.
- [5] Ji K, Kim J, Lee M, et al. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea [J]. Environmental Pollution, 2013(178):322-328.
- [6] Satpathy D, Reddy M V, Dhal S P. Risk assessment of heavy metals contamination in paddy soil, plants, and grains (*Oryza sativa* L.) at the east coast of India [J]. BioMed Research International, 2014, 2014(3/4):545473.
- [7] Kim M, Wolt J D. Probabilistic risk assessment of dietary cadmium in the South Korean population [J]. Food Additives and Contaminants, 2011, 28(1):62-70.
- [8] 苏婧怡. 贝类中重金属镉的风险评估 [D]. 青岛:中国海洋大学,2012:19-26.
Su J Y. Study on risk assessment of cadmium in molluscs [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012:19-26.
- [9] 陈志军,李 耘,陈 晨,等. 食源性健康风险评估的二维蒙特卡罗方法 [J]. 中国卫生统计,2010(5):501-504.
Chen Z J, Li Y, Chen C, et al. Two-dimensional monte carlo analysis method for food-borne health risk assessment [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2010(5):501-504.
- [10] 张玉莲,闫天增. 内梅罗指数法在土壤重金属污染评价中的应用 [J]. 河南教育学院学报(自然科学版),2012,21(2):35-39.
Zhang Y L, Yan T Z. Application of nemerow index method in the evaluation of soil heavy metal pollution [J]. Journal of Henan Institute of Education(Natural Science Edition), 2012, 21(2):35-39.
- [11] 李良忠,杨 彦,蔡慧敏,等. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价 [J]. 中国环境科学,2013,33(S1):60-65.
Li L Z, Yang Y, Cai H M, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils in Taihu Lake basin agricultural area [J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1):60-65.
- [12] Li G, Sun G X, Williams P N, et al. Inorganic arsenic in Chinese food and its cancer risk [J]. Environment International, 2011, 37(7):1219-1225.
- [13] USEPA. Exposure factors handbook [R]. Washington D C: Office of Research and Development, 1997:104-126.
- [14] 段文佳. 水产品中甲醛的暴露评估与风险管理研究 [D]. 青岛:中国海洋大学,2011:42-47.
Duan W J. Primary study on exposure assessment and risk management of formaldehyde in aquatic products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011:42-47.
- [15] Rafiq M T, Aziz R, Yang X, et al. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils: a model to improve soil environmental quality guidelines for food safety [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014(103):101-107.
- [16] 郑宏艳,刘书田,米长虹,等. 土壤-水稻籽粒系统镉富集主要影响因素统计分析 [J]. 农业环境科学学报,2015,34(10):1880-1888.
Zheng H Y, Liu S T, Mi C H, et al. Statistical analysis of factors affecting Cd bioaccumulation in soil-rice grain system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10):1880-1888.

[17] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, 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(5): 1551-1561.

[18] 杨胜香, 易浪波, 刘 佳, 等. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 17-23.

Yang S X, Yi L B, Liu J, et al. Heavy metals concentrations and health risk in vegetables grown on Mn and Pb/Zn mine-land in Huayuan County, West Hunan Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 17-23.

[19] 吴 迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1992-1998.

Wu D, Yang X Z, Li C X, et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in typical lead-zinc mining areas in Guizhou Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 1992-1998.

[20] 高 博, 王晓君, 周怀东, 等. 北京城市道路尘土中铅同位素特征及其源解析 [J]. 环境化学, 2011, 30(5): 1045-1046.

Gao B, Wang X J, Zhou H D, et al. Lead isotope signatures and source identification in urban road dust of Beijing City [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(5): 1045-1046.

[21] 平 华, 马智宏, 王纪华, 等. 农产品质量安全风险评估研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 674-680.

Ping H, Ma Z H, Wang J H, et al. Advances in risk assessment of agricultural product quality and safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(3): 674-680.

[22] 袁 鹏, 李文秀, 彭剑峰, 等. 国内外累积性环境风险评估研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(5): 393-400.

Yuan P, Li W X, Peng J F, et al. Research progress of cumulative environmental risk assessment at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(5): 393-400.

(上接第 98 页)

[21] 李谦盛, 郭世荣, 李式军. 基质 EC 值与作物生长的关系及其测定方法的比较 [J]. 中国蔬菜, 2004(1): 70-71.

Li Q S, Guo S R, Li S J. The relationship between crop growth and substrate EC value and the comparison of its measuring method [J]. China Vegetables, 2004(1): 70-71.

[22] Zhang C F, Trofymow J A, Jamieson R C, et al. Litter decomposition and nitrogen mineralization from an annual to a monthly model [J]. Ecological modelling, 2010, 221: 1944-1953.

[23] Prescott C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils [J]. Biogeochemistry, 2010, 101: 133-149.

[24] Musvoto C, Campbell B M, Kirchmann H. Decomposition and nutrient release from mango and miombo woodland litter in Zimbabwe [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 1111-1119.

[25] 王 芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料科学学报, 2011, 17(3): 702-709.

Wang F, Zhang J S, Gao P C, et al. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 702-709.

[26] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响 [J]. 植物营养与肥料科学学报, 2009, 15(6): 1311-1316.

Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1311-1316.

[27] Qiu S J, Ju X T, Ingwersen J. Changes in soil carbon and nitrogen pools after shifting from conventional cereal to greenhouse vegetable production [J]. Soil & Tillage Research, 2010, 107(2): 80-87.

[28] Dilly O, Munch J C, Pfeiffer E M. Enzyme activities and litter decomposition in agricultural soils in northern, central, and southern Germany [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 70: 197-204.

[29] 赵 彬, 孙 龙, 胡海清, 等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 450-459.

Zhao B, Sun L, Hu H Q, et al. Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of *Larix gmelinii* forest in autumn [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 450-459.

[30] Smyth C E, Macey D, Trofymow J A. Long-term litter decay in Canadian forests and the influence of soil microbial community and soil chemistry [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 80: 251-259.

[31] Pascault N, Cécillon L, Mathieu O, et al. In situ dynamics of microbial communities during decomposition of wheat, rape, and alfalfa residues [J]. Microbial Ecology, 2010, 60(4): 816-828.