

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017112904

王硕, 罗杰, 蔡立梅, 等. 土壤-水稻系统中重金属的富集特征及对土壤元素标准限的判定[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1508-1514.

WANG Shuo, LUO Jie, CAI Limei, et al. Enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system and determination of the standard range of soil elements[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(7): 1508-1514.

土壤-水稻系统中重金属的富集特征及 对土壤元素标准限的判定*

王 硕^{1,2} 罗 杰^{1,2} 蔡立梅^{1,2,3**} 王秋爽^{1,2} 唐翠华^{1,2}
穆桂珍^{1,2} 蒋慧豪^{1,2}

(1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉, 430100; 2. 长江大学资源与环境学院, 武汉, 430100;
3. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州, 510640)

摘 要 在调查研究广东省江门市土壤与水稻元素的含量基础上,对江门市水稻重金属元素的富集特征进行了探讨,并根据水稻重金属富集系数与土壤重金属含量的关系趋势,对暂无明确标准的土壤元素进行适宜含量的判定. 结果表明,水稻重金属 As、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Hg 和 Cr 元素中,部分样品 Cd 的富集系数大于 1 且小于 2,表明存在一定的富集状况,其他元素的富集系数均未超过 1,表明并无明显富集. 水稻重金属的富集系数的顺序为: Cd>Cu>Zn>Ni>As>Hg>Cr>Pb. 水稻中重金属元素的富集系数随土壤重金属含量升高的变化趋势分为两部分,开始为明显降低,当达到一个阈值时降低趋势明显变缓. 与《土壤环境质量标准》I 级标准相比,除 Hg 和 Pb 超标率较高外,这个阈值基本处于各元素标准值的 1/5—1/3 之间,同时也表明土壤中各重金属含量值在此范围内为适宜含量. 水稻中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 元素的富集系数与土壤对应元素的含量比值与重金属元素趋势一致,即可利用土壤重金属元素呈现的规律判断无明确标准元素的适宜含量范围. 可以得出土壤中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 的含量适宜范围分别为: 450—800、480—800、900—1500、2.4—4.0、75—125、123—205、1.2—2.0 mg·kg⁻¹.

关键词 土壤-水稻系统, 重金属, 富集特征, 元素标准限, 广东省江门市.

Enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system and determination of the standard range of soil elements

WANG Shuo^{1,2} LUO Jie^{1,2} CAI Limei^{1,2,3**} WANG Qiushuang^{1,2}
TANG Cuihua^{1,2} MU Guizhen^{1,2} JIANG Huihao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technologies of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, 430100, China; 2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, 430100, China;
3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: Based on the study of element distribution in soil and rice samples collected from

2017 年 11 月 29 日收稿 (Received: November 29, 2017).

* 国家自然科学基金 (41203061), 湖北省自然科学基金 (2015CFB603), 湖北省教育厅科学技术研究重点项目 (D20161301), 有机地球化学国家重点实验室开放基金 (OGL-201408) 和长江大学大学生创新创业训练项目 (2015007, 2016006) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41203061), the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (2015CFB603), the Science & Technology Project of Education Department, Hubei Province, China (D20161301), the State Key Laboratory of Organic Geochemistry, GIGCAS (OGL-201408) and Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates of Yangtze University (2015007, 2016006)

* * 通讯联系人, E-mail: clmktz88@yangtzeu.edu.cn

Corresponding author, E-mail: clmktz88@yangtzeu.edu.cn

Jiangmen city, Guangdong province, the enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system were investigated in the present study. The soil element contents with no clear standards were determined by the relationship between enrichment coefficients of heavy metals in rice and their concentrations in soil. The enrichment coefficients of Cd in rice were 1—2, indicating a certain degree of Cd enrichment in the study area. The enrichment coefficients of other elements were less than 1, showing no significant enrichment. The enrichment coefficients of heavy metals in rice are in the order: Cd>Cu>Zn>Ni>As>Hg>Cr>Pb. With the increase of heavy metal contents in soil, the enrichment factors of heavy metals in rice changed in two steps: significantly reduced at first and then the reduction slowed down when they reached corresponding threshold values. Compared with China Environmental Quality Standard for Soils (GB15618—1995, Grade I), the threshold values of heavy metals were basically within the range of 1/5—1/3 of the standard value of each element except Hg and Pb, demonstrating the content of each element within this range is appropriate. The ratio of enrichment coefficients of other elements (S, F, Cl, I, Ga, Sr and Se) in rice to the corresponding elements in soil presented the same trend with heavy metals. By using the distribution pattern of heavy metals in soil to determine the appropriate range of elements with no clear standards, it can be found that the suitable range of other elements (S, F, Cl, I, Ga, Sr and Se) in soil are 450—800、480—800、900—1500、2.4—4.0、75—125、123—205、1.2—2.0 mg·kg⁻¹, respectively.

Keywords: soil-rice system, heavy metal, enrichment characteristics, standard range, Jiangmen City of Guangdong Province.

农田重金属在土壤中的富集会引发复杂的生物效应,一方面会制约作物的生长发育,促使作物早衰,降低产量,并使得作物对营养元素的吸收起到拮抗作用,从而降低其品质;另一方面,农田土壤中的重金属还可以通过根系进入植物体,再通过食物链的传递和富集,直接或间接危害人体健康^[1-4]. 水稻是吸收和富集土壤重金属的重要载体之一,其重金属的富集不仅会影响大米的品质,也会对人体健康造成间接性影响. 目前,土壤-水稻系统中重金属的富集水平及其健康风险研究已经得到相关研究者广泛的关注^[5-7]. 蒋逸骏^[5]等对湘北某镇进行土壤-水稻系统中重金属累积状况研究,利用富集因子分别通过糙米、植株和根系三部分探讨重金属的富集状况等;陈迪云^[8]等对福建沿海经济区水稻的重金属吸收系数进行了探讨等.

土壤环境是一个复杂的生态系统,其中包含大量植物必需或非必需的元素. 目前,土壤元素中几种常见的重金属元素(如 Cr、Ni、Cu、Pb、Zn 等)均有明确的国家限量标准,但还有很多元素并没有明确的限量标准(如 S、F、Cl、I、Ga、Sr 等),以致对土壤中很多元素适宜含量以及污染水平的高低无法做出相应的判断.

江门市是广东省重要的水稻种植区,江门市的水稻中重金属的富集状况同样影响到其品质及人体健康状况. 本研究对江门市水稻和稻田土壤开展调查,探讨江门市水稻和土壤中重金属的含量水平以及水稻中重金属的富集特征. 根据水稻重金属的富集系数和土壤重金属含量的关系趋势线,得出土壤重金属含量适宜范围的规律,并以此规律对土壤中无明确限量标准元素的适宜含量作出判定. 本次探讨对研究区土壤-水稻系统今后的研究以及对无国家明确标准的土壤元素做进一步研究提供参考.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

江门市(21°27'—22°51'N, 111°59'—113°15'E)位于广东省珠江三角洲地区. 东邻佛山市顺德区、中山市、珠海市斗门区,西接阳江市的阳东县、阳春市,北与新兴县、佛山市高明区、南海区为邻,南濒南海,毗邻港澳. 江门市地势西北高,东南低,北部、西北部山地丘陵广布,东部、中部、南部河谷、冲积平原、

三角洲平原宽广,丘陵、台地错落其间,沿海滩发育,组成错综复杂的多元化地貌景观.江门市属于华南双季稻稻作区闽粤桂台平原丘陵双季稻亚区,主要特征为无明显的冬季特征.水稻生长期日照时数 1200—1500 h,降水量 1000—2000 mm. 籼稻安全生育期 212—253 d;粳稻 235—273 d,适合双季稻生长.常年双季稻占水稻面积的 94%左右.

1.2 样品采集

样品采集时间为水稻大面积采摘或收获期,水稻采样点同时采集作物及根系土壤,样品采取分早茬和晚茬分别采取,以晚茬为主.样品采集使用 GPS 定位,由于水稻生长的不均一性,采用多点取样,避开田边 2 m,按梅花形采样法采样.每一个采样点选取 3—5 个面积 1—3 m²的水稻地块进行取样.稻谷及时脱粒混合,经干燥后装入白色布袋,稻谷采样时每件样品重量应大于 4000 g.根系土壤以水稻根系周围的土壤为样品介质,将植株拔起,抖取植株根系所带起的土壤,去除了植株根茎及其它杂物,装入聚乙烯袋,样品原始重量不少于 1000 g.稻谷与对应根系土壤分别采集样品 26 个.

1.3 样品处理与测试

稻谷带回实验室后,用自来水和蒸馏水洗净,晾干后放入烘箱,105 °C 杀青 30 min,然后在 70 °C 下烘干至恒重,使用小型脱壳机将水稻籽粒脱壳,收集糙米,使用非金属器械粉碎,过 200 目尼龙筛.土壤样品自然风干,剔除样品中的植物根系、有机残渣及可见侵入体,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨,过 200 目尼龙筛.所有样品用 1:3 体积比硝酸、盐酸溶样.

Cr、Ni、Cu、Pb、Zn、Cl、S、Sr 及 Ga 的含量利用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,Cd 的含量采用等离子体质谱法 ICP-MS 测定,As、Hg 和 Se 的含量采用原子荧光光谱法测定,F 和 I 的含量分别采用离子选择电极法和催化比色法测定.样品测试在国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成.分析过程中为保证精确度并减少随机误差,实验分析过程采用超纯水,所用的试剂均为优级纯.土壤样品和水稻样品在分析过程中分别加入 GSS-1 和 GSS-4 作为位置样品、平行样和空白样进行质量控制,所有样品分析均重复 3 次,取平均值,平行样相对偏差均小于 5%,样品加标回收率在 89.0%—108.0%之间,符合控制范围要求.

1.4 数据处理

对原始数据采用直方图法、域法(均值 ± 3 倍标准差)和地球化学分析相结合的方法剔除异常值.重金属元素含量统计、正态检验及曲线拟合在 SPSS20.0、Microsoft Excel 2010 和 Microsoft Visio 2010 中完成.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 土壤与水稻重金属含量特征

由表 1 看出,江门市稻田根系土壤中 As、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Hg 和 Cr 的含量范围分别为 0.42—20.00、2.80—46.00、17.50—67.10、17.60—115.00、0.05—0.25、1.80—37.50、0.05—0.48 mg·kg⁻¹和 4.30—88.70 mg·kg⁻¹,变化幅度较大.其中,As、Cu、Ni 及 Cr 这 4 种元素的变异程度也较大,其变异系数分别为 79.70%、65.72%、77.25%、60.99%,表明可能受人为影响较大^[9].与《土壤环境质量标准》I 级标准^[10]相比(由于研究区土壤元素含量与《土壤环境质量标准》II 级标准元素含量值相差较大,关系不够明确,且 I 级标准更接近土壤背景值,故采用前者),江门市稻田根系土壤中 As、Pb、Zn、Hg 含量存在一定的超标状况,样本超标率分别为 7.69%、80.77%、11.54%、61.54%.可见 Pb 和 Hg 样品超标较为严重,可能存在一定的污染.

由于《食品中污染物限量》(GB2762—2005)标准^[11]中 As 的限量标准是以无机砷的形式限定的,而测试所得结果为总砷的含量,故无法直接进行对比,需要进行一定的比例换算才能对比.有研究表明^[12-13],水稻中 As 的大部分为毒性较强的无机砷[As(III)、As(V)],两者约占水稻总砷含量的 87%.本研究中总砷与无机砷之间以此比例进行换算.由表 2 可看出,江门市水稻中重金属元素 As、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Hg 和 Cr 的含量范围分别为 0.06—0.16、1.46—5.81、0.01—0.09、12.91—20.65、0.02—0.49、0.10—0.74、0.001—0.007、0.07—0.78 mg·kg⁻¹,其平均值分别为 0.09、3.19、0.03、17.34、0.10、0.30、0.002、

0.16 mg·kg⁻¹(As 的含量范围与平均值均为换算后无机砷的含量). 与《食品中污染物限量》(GB2762—2005)标准进行比较,所测的水稻各重金属元素中,Cd 元素超过标准限量值,Cd 含量的样本超标率为 3.85%(见表 2). 可见江门市水稻中各重金属元素,除 Cd 外,均无污染现象.

表 1 江门市土壤中元素含量特征统计

Table 1 Descriptive statistics of the element contents in the soil in Jiangmen City

土壤 Soil	范围 Range/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Min/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	CV/%	《土壤环境质量 标准》I 级标准 Standard I / (mg·kg ⁻¹)	超标率 Over standard rate/%
As	0.42—20.00	0.42	20.00	6.75	5.38	79.70	15.00	7.69
Cu	2.80—46.00	2.80	46.00	19.28	12.67	65.72	100.00	0.00
Pb	17.50—67.10	17.50	67.10	51.60	14.68	28.45	35.00	80.77
Zn	17.60—115.00	17.60	115.00	60.97	28.04	45.99	100.00	11.54
Cd	0.05—0.25	0.05	0.25	0.11	0.04	36.36	0.20	0.00
Ni	1.80—37.50	1.80	37.50	13.14	10.15	77.25	40.00	0.00
Hg	0.05—0.48	0.05	0.48	0.20	0.11	0.55	0.15	61.54
Cr	4.30—88.70	4.30	88.70	38.89	23.72	60.99	90.00	0.00
S	181.00—1187.60	181.00	1187.60	461.51	217.90	47.21	—	—
F	220.00—729.00	220.00	729.00	450.48	129.75	28.80	—	—
Cl	42.00—478.60	42.20	478.60	127.03	125.39	98.70	—	—
I	0.49—2.35	0.49	2.35	1.29	0.49	37.98	—	—
Ga	6.70—26.30	6.70	26.30	18.80	5.09	27.07	—	—
Se	0.13—0.56	0.13	0.56	0.38	0.11	28.95	—	—
Sr	9.20—77.20	9.20	77.20	45.04	17.68	39.25	—	—

表 2 江门市水稻中元素含量特征统计

Table 2 Descriptive statistics of the element contents in the rice in Jiangmen City

水稻 Rice	范围 Range/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Min/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	国家食品 卫生标准 Standard/ (mg·kg ⁻¹)	超标率 Over standard rate/%	富集系数 Enrichment coefficient
As	0.06—0.16	0.06	0.16	0.09	0.02	0.15	0	0.0131
Cu	1.46—5.81	1.46	5.81	3.19	1.03	10	0	0.1654
Pb	0.01—0.09	0.01	0.09	0.03	0.02	0.2	0	0.0006
Zn	12.91—20.65	12.91	20.65	17.34	2.08	20	0	0.2844
Cd	0.02—0.49	0.02	0.49	0.10	0.09	0.2	3.85	0.8568
Ni	0.10—0.74	0.10	0.74	0.30	0.16	—	—	0.0225
Hg	0.001—0.007	0.001	0.007	0.002	0.001	0.02	0	0.0119
Cr	0.07—0.78	0.07	0.78	0.16	0.15	1	0	0.0040
S	0.12—0.77	0.12	0.77	0.16	0.13	—	—	0.0004
F	0.07—1.48	0.07	1.48	0.55	0.37	1	11.54	0.0012
Cl	0.01—0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	—	—	0.0001
I	0.08—0.35	0.08	0.35	0.18	0.07	—	—	0.1410
Ga	0.01—0.02	0.006	0.022	0.012	0.004	—	—	0.0006
Se	0.001—0.269	0.001	0.269	0.03	0.06	0.3	0	0.0890
Sr	0.04—0.46	0.04	0.46	0.14	0.12	—	—	0.0030

2.2 水稻对土壤元素的富集特征

富集系数反映土壤-作物中污染物迁移积累的程度,为作物某部位污染物的浓度与土壤中污染物的全量的比值^[14]. 作物可食部分对土壤中重金属的富集能力用富集系数来表示,富集系数越大,其对土壤中重金属的富集能力就越强. 它可较好地反映稻米对土壤重金属的富集能力和重金属从土壤向稻米的

迁移积累强度^[15]. 在所研究的水稻重金属 As、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Hg 和 Cr 元素中, Cd 部分样本的富集系数大于 1 且小于 2, 表明存在一定的富集状况, 其他元素的富集系数均未超过 1, 表明并无明显富集. 水稻重金属的富集系数的顺序为: Cd>Cu>Zn>Ni>As>Hg>Cr>Pb(见表 2). 已有研究结果表明^[16-17], 单一元素污染时富集系数一般为 Cd>Zn>Cu>Pb, 本次研究水稻重金属的富集系数大小排序与已有研究结果基本一致. 据福建沿海水稻-土壤重金属转移规律的研究发现, 其水稻中重金属富集系数的大小排序为: Cd>Zn>Cu>Cr>Ni>As>Hg>Pb^[8]. 另据对长江三角洲地区水稻中土壤重金属含量的调查研究发现, 其富集系数大小排序为: Cd>Cu>Zn>As>Hg>Pb>Cr^[18]. 可见 Cd、Zn、Cu 较易在水稻中富集. 对比土壤元素 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 的含量, 进行水稻中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 的富集水平分析(表 2), 可看出其富集系数均小于 1, 表明水稻中这些元素均无明显富集, 其富集系数大小排序为: I>Se>S>F>Ga>S>Cl.

2.3 对暂无国家标准的元素含量限制判定

结合江门市土壤重金属含量与水稻重金属的富集系数, 将水稻重金属的富集系数记为 X . 作出以水稻重金属元素的富集系数为纵坐标, 土壤重金属含量为横坐标的散点图, 并得出相应的散点趋势曲线(图 1). 可以看出水稻中重金属元素的富集系数随土壤重金属含量升高的变化趋势分为两部分, 开始为明显降低, 当达到一个阈值时降低趋势明显变缓. 与《土壤环境质量标准》I 级标准相比, 可看出除 Hg 和 Pb 外, 这个阈值基本处于各元素标准值的 1/5—1/3 之间, 同时也表明土壤中各元素含量值在此含量值范围内为适宜含量(见表 3). 而 Hg 和 Pb 由于土壤样本超标率较高, 故上述规律并不明显.

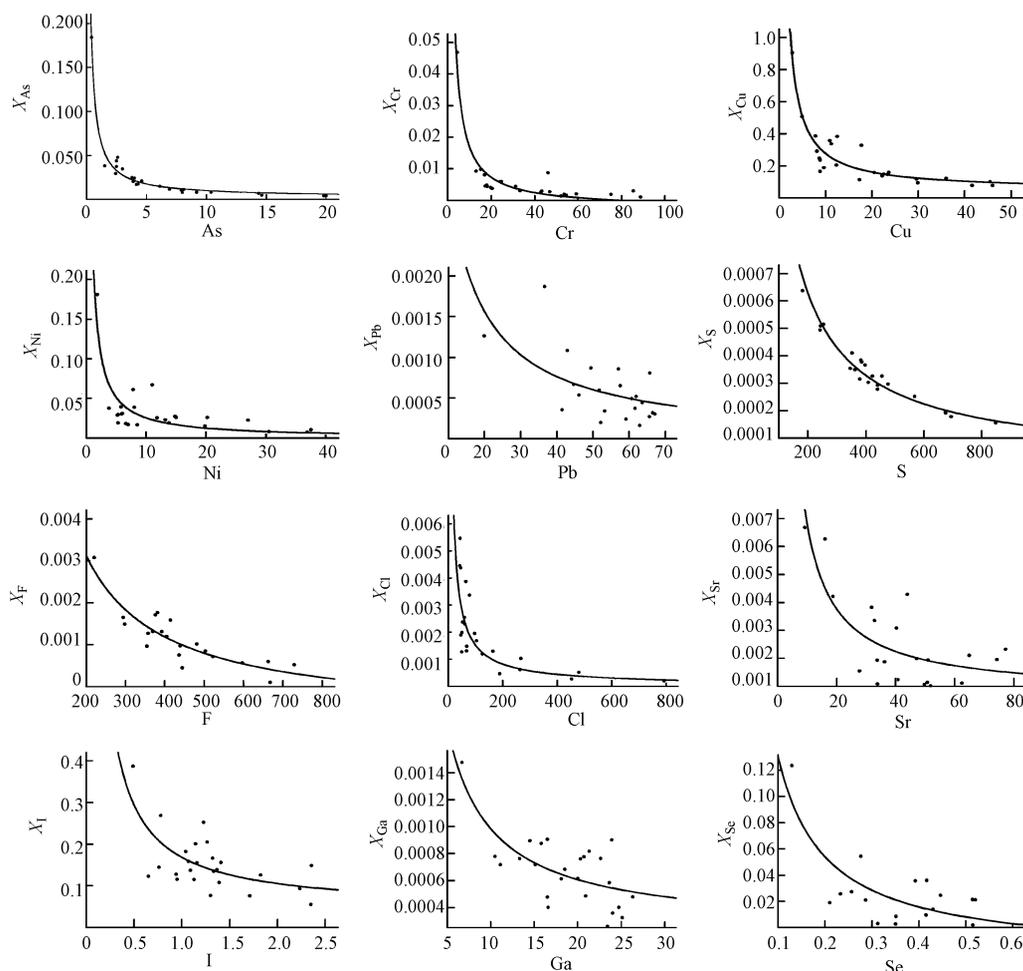


图 1 江门市水稻元素富集系数与土壤元素含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的关系

Fig.1 The relationship between element coefficients of rice and element contents ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of soil in Jiangmen City

由于土壤元素 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 中, 目前除 Se 有明确的行业标准外, 其他元素均无明确的国家限量标准, 故本研究试图根据得出的已有国家限量标准的土壤重金属元素的适宜含量范围规律, 对暂无国

家标准的土壤元素含量限制作出判定. 同样将水稻中上述元素的富集系数记为 X , 作出以上述元素富集系数为纵坐标, 土壤相应元素含量值为横坐标的散点图, 得出其散点趋势曲线(图 1). 可见水稻中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 元素的富集系数与土壤对应元素含量值所呈现的趋势和重金属元素一致, 即水稻中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 元素的富集系数随这些元素在土壤中的含量值升高最初显著降低, 当达到一个阈值时降低趋势趋于平稳. 则可根据重金属元素呈现的规律对上述暂无国家标准元素的曲线作切线, 由此确定对应的根系土壤浓度值存在的范围(即阈值所在范围), 并以此反向推算无明确标准元素的适宜含量范围. 可以得出土壤中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 的含量限制范围分别为: 450—800、480—800、900—1500、2.4—4.0、75—125、123—205、1.2—2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 3), 即上述无明确国家标准的土壤元素低于此范围最高值可认为处于适宜含量范围内.

表 3 江门市土壤元素阈值限

Table 3 Threshold range of soil element in Jiangmen City

元素 Elements	As	Cu	Cr	Ni	Zn	Hg	Cd	Pb
阈值限 Threshold range/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	2.5—5.5	8—15	20—90	6—20	30—55	0.12—0.20	0.06—0.15	35—60
《土壤环境质量标准》I 级 Standard I/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	15	100	90	40	100	0.15	0.2	35
元素 Elements	S	Cl	F	I	Ga	Sr	Se	
阈值限 Threshold range/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	450—800	480—800	900—1500	2.4—4.0	75—125	123—205	1.2—2.0	

3 结论(Conclusions)

(1) 与《土壤环境质量标准》I 级标准相比, 江门市稻田土壤中 As、Pb、Zn、Hg 含量存在一定的超标状况, 样本超标率分别为 7.69%、80.77%、11.54%、61.54%. Pb 和 Hg 样品超标较为严重, 存在一定的污染.

(2) 与《食品中污染物限量》(GB2762—2005) 标准进行比较, 江门市水稻各重金属元素中, 部分样品 Cd 含量超过标准限量值, 样本超标率为 3.85%. 可见江门市水稻中各重金属元素, 除 Cd 外, 均无污染现象. 水稻重金属的富集系数的顺序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb}$.

(3) 结合江门市土壤重金属含量与水稻重金属的富集系数关系趋势线, 并与《土壤环境质量标准》I 级标准相比较. 得知除 Hg 和 Pb 外, 趋势线中存在一阈值, 这个阈值基本处于各元素标准值的 1/5—1/3 之间, 同时也表明土壤中各元素含量值在此含量值范围内为适宜含量. 根据得出的已有国家限量标准的土壤重金属元素的适宜含量范围规律, 对暂无国家标准的土壤元素含量限制作出判定. 水稻中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 元素的富集系数与土壤对应元素含量值所呈现的趋势与重金属元素一致. 土壤中 S、F、Cl、I、Ga、Sr、Se 的含量限制范围分别为: 450—800、480—800、900—1500、2.4—4.0、75—125、123—205、1.2—2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

参考文献(References)

- [1] DUDKA S, MILLER W P. Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain[J]. Journal of Environmental Science & Health. Part. b Pesticides Food Contaminants & Agricultural Wastes, 1999, 34(4): 681-708.
- [2] HOSSAIN M F, KHONDAKER M. Environmental contamination and seasonal variation on heavy metals in rice fields[J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2006, 10(1): 8-12.
- [3] MCLAUGHLIN M J, PARKER D R, CLARKE J M. Metals and micronutrients-food safety issues[J]. Field Crops Research, 1999, 60(1-2): 143-163.
- [4] 夏芳, 王秋爽, 蔡立梅, 等. 有色冶金区土壤-蔬菜系统重金属污染特征及健康风险分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 865-873.

- XIA F, WANG Q S, CAI L M, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in non-ferrous metals smelting area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(6): 865-873(in Chinese).
- [5] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湖北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 410-420.
- JIANG Y J, HU X F, SHU Y, et al. Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in the paddy fields-a case study of a town in the northern part of Hunan Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 410-420(in Chinese).
- [6] 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估[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 zinc-lead mining area in Guizhou province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10): 1992-1998(in Chinese).
- [7] 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 L Y, LI L Q, PAN G X. 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]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(9): 2792-2797(in Chinese).
- [8] 陈迪云, 谢文彪, 宋刚, 等. 福建沿海地区土壤-水稻重金属转移规律研究[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2010, 9(4): 61-66.
- CHEN D Y, XIE W B, SONG G, et al. The characteristics of heavy metal transfer from soil to rice in littoral area, Fujian province[J]. *Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition)*, 2010, 9(4): 61-66(in Chinese).
- [9] 冯经昆, 钟山, 孙立文, 等. 重庆某垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染分布特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2014, 33(6): 969-975.
- FENG J K, ZHONG S, SUN L W, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metal contamination in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant in Chongqing[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(6): 969-975(in Chinese).
- [10] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- National Environmental Protection Agency, State Bureau of Technical Supervision. GB15618-1995 Environmental quality standard for soils [S]. Beijing: China Standards Press, 2006(in Chinese).
- [11] 中华人民共和国卫生部. GB 2762-2005 食品安全国家标准, 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Ministry of Health P. R. China. GB 2762-2005 The limits of pollutants in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).
- [12] DIAZ O P, LEYTON I, MU OZ O, et al. Contribution of water, bread, and vegetables (raw and cooked) to dietary intake of inorganic arsenic in a rural village of Northern Chile[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2004, 52(6): 1773-1779.
- [13] MUNOZ O, DIAZ O P, LEYTON I, et al. Vegetables collected in the cultivated Andean area of northern Chile: Total and inorganic arsenic contents in raw vegetables[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(3): 642-647.
- [14] 潘根兴, ANDREW C C, ALBERT L P 等. 土壤-作物污染物迁移分配与食品安全的评价模型及其应用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 854-858.
- PAN G X, ANDREW C C, ALBERT L P et al. Modeling transfer and partitioning of potentially toxic pollutants in soil-crop system for human food security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 854-858(in Chinese).
- [15] 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 221-226.
- SHEN T Z, ZHU M X, XIAO J. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of Tianmen and its health risk assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 221-226(in Chinese).
- [16] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. *环境化学*, 2002, 21(2): 110-116.
- MO Z, WANG C X, CHEN Q, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 110-116(in Chinese).
- [17] 吴燕玉, 余国营. Cd, Pb, Cu, Zn, As 复合污染对水稻的影响[J]. *农业环境科学学报*, 1998, 17(2): 49-54.
- WU Y Y, YU G Y. Compound pollution of Cd, Pb, Cu, Zn and As on lowland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1998, 17(2): 49-54(in Chinese).
- [18] 肖俊清, 袁旭音, 李继洲. 长江三角洲地区土壤和水稻重金属污染特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(19): 148-151.
- XIAO J Q, YUAN X Y, LI J Z. Characteristics of heavy metal pollution in soil and rice of Yangtze River Delta Region[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(19): 148-151(in Chinese).