

苏州市不同区域水稻籽粒重金属积累特征与健康风险评价

齐雁冰^{1,2}, 黄 标¹, 杨玉峰¹, Darilek J L¹, 赵永存¹, 孙维侠¹, 王志刚¹

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要:以苏州市 7 个县市的水稻籽粒为研究对象,在 2006 年采集的 449 份水稻籽粒样品的基础上,分析了稻米中 Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 的积累特征,并评价了样品的健康风险。结果显示,苏州市水稻籽粒重金属积累平均含量均不超标,但水稻籽粒 Pb 存在 29.49%的样点超标率,Cu、Cd 和 Cr 的超标样点一般在 4 个以下。单因子污染指数评价结果显示,水稻籽粒重金属元素污染指数高低顺序为 Pb>Cr>Cu、Zn>Cd,其中昆山和吴江水稻籽粒受到 Pb 的轻度污染。综合污染指数评价表明,水稻籽粒重金属污染处于警戒线级别,且水稻籽粒的污染是由于 Pb 的积累量较高引起的,其中太仓和张家港两市水稻籽粒属于安全等级,昆山、吴中、相城和常熟处于警戒线等级,吴江风险较高。暴露风险评价结果显示,研究区存在水稻籽粒 Cr 暴露风险,而水稻籽粒 Pb 仅在个别县市暴露风险高,整体风险并不高。

关键词:水稻籽粒;重金属;积累特征;风险评价;苏州市

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)04-0659-07

Heavy Metal Accumulation Characteristics and Risk Assessment of Rice Grain in Different Regions of Suzhou City, China

QI Yan-bing^{1,2}, HUANG Biao¹, YANG Yu-feng¹, Darilek J L¹, ZHAO Yong-cun¹, SUN Wei-xia¹, WANG Zhi-gang¹

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.College of Resources and Environment, North-west A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to concern about food safety of rapidly developing regions in China, 449 rice grain samples were collected from 7 counties of Suzhou City in 2006. The contents of Cu, Pb, Cd, Cr and Zn in rice grain samples were analyzed. According to relative national standards of China and human health risk assessment, pollution and safety of rice grain in study area were evaluated. Average heavy metal concentration in rice grain did not exceed the national critical limit in Suzhou City. Excessive Pb accumulation in rice grains was a problem faced by the city. The percentage of sites that exceeded the critical limit was 29.49% for Pb in Suzhou, and most of those sites were close to the industries. Less than four sites exceeded the critical limit for Cu, Cd, and Cr. The results by single element assessment for the pollution indexes indicated that Pb>Cr>Cu>Zn>Cd. For the administrative regions under Suzhou, rice grain Pb accumulation in Kunshan and Wujiang were classified as slight pollution. Synthesis assessment indicated that rice grains were at risk of pollution in Suzhou. Excessive Pb accumulation was responsible for the pollution of rice grains. Rice grains were classified as safety in Taicang and Zhangjiagang, at risk in Kunshan, Wuzhong, Xi-anqiangcheng and Changshu, and slightly polluted in Wujiang. Risk assessment showed that rice grains in all soils of the region pose some Cr exposure risk to food safety and rice from some area was at Pb exposure risk. Fortunately, it still fell into the safe category.

Keywords: rice grain; heavy metals; accumulation characteristics; risk assessment; Suzhou City

收稿日期:2009-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(40773075);国家重大基础支持计划(973)项目(2002CB410800)

作者简介:齐雁冰(1976—),男,副研究员,主要从事土壤资源与信息技术研究。E-mail:ybqi@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:黄 标 E-mail:bhuang@issas.ac.cn

我国土壤污染现象普遍,而且土壤重金属环境污染有扩大的趋势。进入土壤的重金属可通过根系进入植物体,再通过食物链传递和富集,最终危害人体健康^[1]。近年来,粮食作物尤其是稻米的重金属污染问题已备受关注。水稻是我国主要的粮食作物,它具有对 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Cr 等重金属强吸收的特性,从而提出了水稻的食品安全问题,特别是我国长江以南以水稻为主食的居民的健康风险问题。近十几年来,许多研究者从水稻籽实对重金属的吸收富集规律^[2-3]、水稻对重金属的吸收迁移和累积的机制^[4-5]、重金属的赋存形态^[6-7]、受重金属污染后水稻的生理生化效应^[6,8-9]等方面作了较为深入的探讨,这些研究为深入开展水稻对重金属的积累及对人体健康的影响奠定了基础。尽管水稻在我国的栽培品种众多、范围广,但有关水稻中重金属含量特征以及区域差异性系统研究尚少。长江三角洲是我国主要的稻谷种植区之一,初步的研究结果表明,该区域土壤重金属含量较高,部分地区超过了土壤质量标准^[10-11]。因此调查该区域水稻中的重金属含量水平,研究水稻对土壤重金属的吸收状况与制约因素有着重要的意义。

本文以长江三角洲中部的江苏省苏州市水稻种植区为研究对象,研究不同区域的水稻中重金属含量特征与差异性,为该区域选择合理农业措施和优选种植的品种提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

苏州市地处长江三角洲太湖平原的东部,位于北纬 30°46′~32°02′,东经 120°11′~121°16′。全市面积 8 488 km²,其中平原约 4 660 km²,水面约 3 607 km²,总人口约 616 万人。苏州市下辖张家港市、常熟市、太仓市、昆山市、吴江市,吴中区、相城区。苏州地处北亚热带南缘湿润季风气候区,温暖潮湿多雨,四季分明,冬、夏季长,春、秋两季较短。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 4 991.9 $^{\circ}\text{C}$,年平均气温 15.7 $^{\circ}\text{C}$,雨量充沛,降水量约 1 063 mm,集中在 4—9 月。苏州市土壤类型主要分为雏形土和人为土两种,历史上,雏形土地地区的种植结构曾以棉花—小麦轮作为主,20 世纪 90 年代后,种植结构逐渐转变为稻—麦、稻—油轮作;人为土地地区的种植结构一直以稻—麦或稻—油轮作为主。苏州是我国经济最发达地区之一,近年来,随着全市经济的快速发展,工业活动越来越强烈,企业的规模和数量越来越大,其中排污的工业企业包括冶金、电子、化工、电镀、纺织印染等。

1.2 样品采集与分析

2006 年 10 月,对苏州市的水稻重金属污染状况进行调查。布点时主要考虑全市的土壤类型、工厂企业的分布及区域之间样点分布的均匀性等因素,平均按 200 hm² 左右布设一个点位,全市共确定采样点 449 个。采样时一般在每个样点 600 m² 范围内采集 4~5 处水稻籽粒,放在干净的布袋中,采样量约为 2 kg。籽粒样品先经自来水冲洗再用去离子水冲洗,自然风干,置于聚乙烯塑料袋中。风干稻谷先将壳与米分离后米粒用不锈钢粉碎机粉碎,过 0.25 mm 孔径筛,置塑料袋中密封备用。

重金属的分析采用硝酸—高氯酸消解(GB/T5009),水稻中 Cd 用石墨炉原子吸收法测定(AA220,美国瓦里安公司),Cu、Pb、Cr 和 Zn 用火焰原子吸收光谱法测定。为确保分析结果的可靠性和准确性,在重金属分析测定过程中,每批样品各有两个空白样品和标准物质(GSV-3,GBW07604)与样品同步分析,质控样品相对误差小于 10%。

1.3 重金属风险评价方法

评价标准采用我国粮食与饲料卫生限量标准,稻米中重金属的风险评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[12-13](分级标准如表 1)。对于大米中重金属的食物安全性,采用临界摄入量来评价供试大米的食物暴露风险。以 USEPA(2000)的参考剂量(R_d值:Cu 无确定值,Zn、Cr、Pb 和 Cd 分别为 300、3.0、3.5 和 1.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)为依据^[12-13],设重金属污染物通过土壤—植物—人体途径的摄入量约为人体实际总摄入量的 50%,根据我国平均食物消费结构,人均每年消费稻麦等谷类粮食作物 206 kg,设谷类全部为大米,则成人每天消费大米 0.564 kg,从而可以计算出大米中各元素的暴露风险。

表 1 重金属污染指数分级标准

Table 1 Classification of pollution index of heavy metals

级别	单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级
1	$P_i < 1$	清洁	$P_{\text{综}} < 0.7$	安全,清洁
2	$1 < P_i < 2$	轻污染	$0.7 < P_{\text{综}} < 1$	警戒线,尚清洁
3	$2 < P_i < 3$	中污染	$1 < P_{\text{综}} < 2$	轻度污染,开始受污染
4	$P_i > 3$	重污染	$2 < P_{\text{综}} < 3$	中度污染,受到重度污染
5			$P_{\text{综}} > 3$	重污染,受到严重污染

1.4 数据处理与分析

数据分析采用 Excel 和 SPSS13.0 进行,利用 Duncan 检验比较不同县市间水稻重金属含量的差异

性;运用方差分析比较土壤类型和工厂企业类型对水稻重金属含量的影响。借助 ArcGIS(9.0)软件制作水稻籽粒重金属含量及风险评价的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 水稻籽粒中重金属积累的总体特征

由表 2 可知,苏州市水稻籽粒中 Cu 的平均含量为 $3.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,未超过国家食品卫生标准限制值 ($>10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但有 1 个样品超标。Cd 和 Cr 的平均含量分别为 $20.62 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均未超出国家食品卫生标准限制值,二者的最高值分别为 $210.70 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是国家食品卫生限制标准的 1.1 倍和 10 倍,分别有 3 个和 2 个样品超标 ($\text{Cd}>200 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cr}>10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而最低值均低于检测限。大部分样品 Pb 含量集中在 $0.05 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,最高达 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是国家食品卫生限制标准的 4 倍多,有 133 个稻米样品 Pb 超标 ($>0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),超标率为 29.49%,而最低值低于检测限。Zn 的平均含量为 $17.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,没有样品超标 (大于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。稻米中重金属积累差异较大,变异系数除 Cu 和 Zn 较低之外,Pb、Cd 和 Cr 均超过 100%,表明 Pb、Cd 和 Cr 可能存在异常积累。

表 2 苏州市稻米籽粒重金属平均含量特征

Table 2 The character of heavy metal contents of rice in Suzhou City

元素	平均值	最大值	最小值	标准离差	变异系数	超标样本	超标率
Cu	3.79	10.23	0.87	1.18	31%	1	0.4%
Pb	0.18	0.82	ns	0.43	211%	133	29.49%
Cd	20.62	210.70	ns	25.49	124%	3	0.7%
Cr	0.38	10.02	ns	0.56	249%	2	0.4%
Zn	17.55	37.1	6.93	3.75	21%	0	0%

注:表中元素单位除 Cd 为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以外,其余元素为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;ns 指含量低于检测限。

2.2 不同县市水稻重金属分布

水稻籽粒 Cu 以张家港市为最高,平均含量高达 $4.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3),其次为太仓和常熟,平均含量分别为 3.46 和 $3.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,吴中、吴江、相城和昆山平均含量较低,含量在 $3.1 \sim 3.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,一个超标点在吴江市。水稻籽粒 Pb 以吴江含量最高(表 3),达 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次是相城和昆山,含量为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,吴中、太仓、常熟和张家港四市最低,含量不足 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Pb 的超标样点则相对分散,常熟市有 43 个样品超标,Pb 含量一般在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下(图 1),

吴江市 12 个样品超标,但超标点 Pb 含量一般在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。水稻籽粒 Cd 除张家港市含量最高达 $37.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之外,其余县市之间无差异,且含量在 $25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下(图 1),在相城、昆山和常熟各有 1 个超标。吴江市的水稻籽粒 Cr 含量高达 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他县市,其他县市含量均在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,Cr 在吴江市和昆山市各有一个超标。水稻籽粒 Zn 则表现为常熟市明显高于其他县市,含量高达 $19.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为吴中,含量为 $17.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而昆山和太仓为最低,含量不足 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 3 苏州市水稻籽粒重金属平均含量

Table 3 Heavy metal content of rice grain in Suzhou City

县市	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn
吴中	3.15a	0.17a(8)	16.50a	0.37a	17.86bc
吴江	3.20a(1)	0.26b(12)	15.04a	0.66b(1)	16.26ab
相城	3.27a	0.20ab(8)	20.40a(1)	0.40a	17.22ab
昆山	3.32a	0.20ab(22)	21.50a(1)	0.45a(1)	15.54a
太仓	3.46ab	0.14ab(13)	23.20a	0.40a	15.70a
常熟	3.84b	0.18a(43)	24.50a(1)	0.29a	19.16c
张家港	4.49c	0.14a(26)	37.50b	—	—

注:表中括号内为超标样点数量;表中元素单位除 Cd 为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以外,其余元素为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;表中同一列不同字母表示不同县市之间在 0.05 水平上差异显著。

2.3 水稻籽粒重金属的风险评价

从单项污染指数来看(表 4),苏州市水稻重金属单项污染指数中 P_{Cu} 、 P_{Cd} 、 P_{Cr} 和 P_{Zn} 均小于 1,表明水稻未受到 Cu、Cd、Cr 和 Zn 的污染;昆山和吴江的 P_{Pb} 均大于 1,其中昆山 P_{Pb} 为 1.06,吴江为 1.28,其他县市 P_{Pb} 的单项污染指数均小于 1,表明昆山市和吴江市水稻具有 Pb 的高风险,其他县市未受到 Pb 的污染。从单项污染指数平均值来看,各元素污染指数中 P_{Pb} 接近于 1,其余元素平均值均小于 1,表明总体上水稻重金属受到 Pb 污染的风险较大。

综合污染指数 $P_{\text{综}}$ 评价表明(表 4),太仓和张家港两市综合污染指数低于 0.7,属安全等级;昆山、吴中、相城和常熟四县市的综合污染指数在 $0.7 \sim 1$ 之间,属警戒线等级;吴江市的综合污染指数为 1.03,属轻污染等级。从综合污染等级图来看(图 2),苏州市综合污染等级分布均相对分散,综合污染的 5 个等级均存在。安全等级主要分布在北部各市,其他等级分布也相对分散,其中重度污染以最南部的吴江市分布最为明显。

2.4 食物暴露风险评价

以不同地区供试大米重金属元素的平均含量为依据,用食物暴露风险评价方法计算,结果见表 5。可

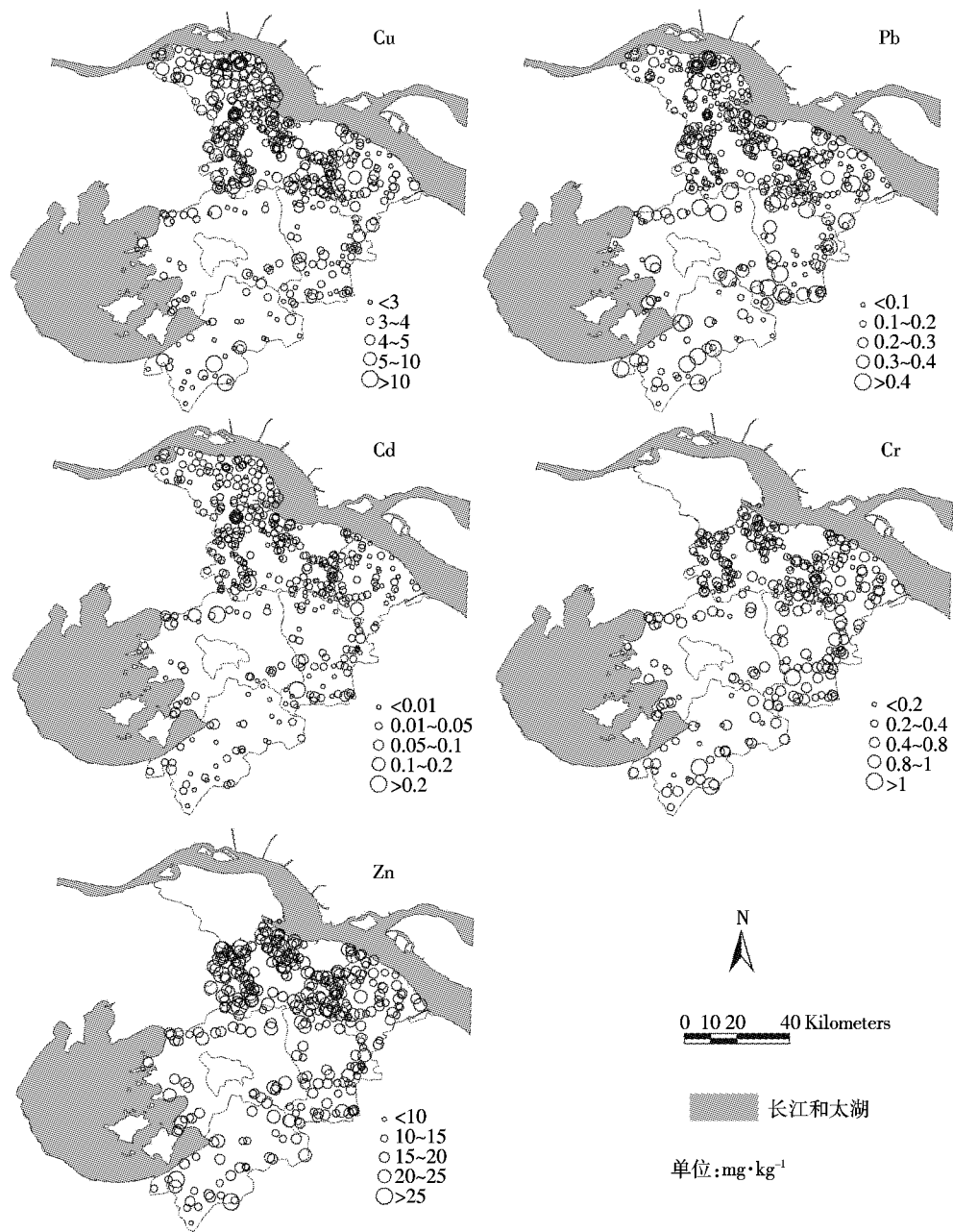


图 1 苏州市水稻籽粒重金属空间分布图

Figure 1 Spatial distribution of heavy metals of rice grain in Suzhou City

表 4 苏州市水稻重金属污染指数

Table 4 Pollution index of heavy metals of rice in Suzhou City

县	P_{Cu}	P_{Pb}	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Zn}	$P_{\text{总}}$
昆山	0.33	1.06	0.10	0.46	0.31	0.95
太仓	0.35	0.70	0.08	0.40	0.31	0.67
吴江	0.32	1.28	0.08	0.66	0.335	1.03
吴中	0.32	0.84	0.12	0.37	0.36	0.76
相城	0.33	0.85	0.18	0.40	0.34	0.83
张家港	0.45	0.71	0.12	—	—	0.64
常熟	0.38	0.91	0.09	0.29	0.38	0.74
平均	0.35	0.91	0.11	0.43	0.34	0.80

以看出,研究区所有区县水稻籽粒除 Cd 外均存在不同程度的潜在暴露风险,尤其是 Cr 暴露风险最高,其次为 Pb、Zn 刚接近潜在暴露风险,Cd 则暴露风险很低,对人体不具有健康危害。总体而言,研究区存在明显的 Cr 暴露风险,而 Pb 仅在个别县市暴露风险高,整体风险并不高。

3 讨论与结论

3.1 水稻籽粒重金属积累及与其他区域的比较

统计显示,我国农作物重金属的食品安全在许多

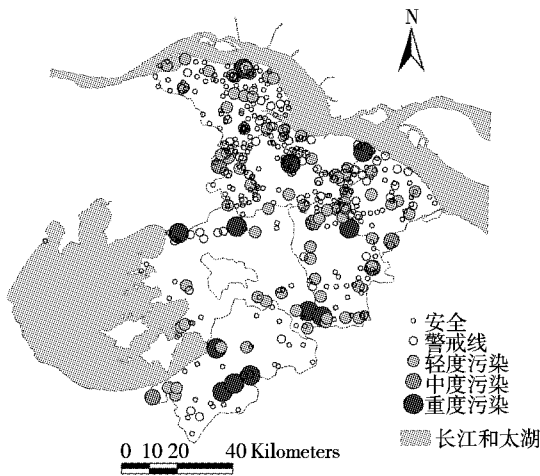


图 2 苏州市水稻综合污染评价图

Figure 2 Evaluation map of rice grain in Suzhou City

地区正受到严重威胁。据农业部稻米及其制品质量监督检验测试中心 2002 年对全国市场稻米安全性抽检结果,稻米中超标最严重的是 Pb,超标率为 28.4%,其次是 Cd,超标率为 10.3%^[14]。苏州市 Pb 的超标率与上述稻米安全性抽测结果接近,Cd 的超标率明显低于上述抽测结果。

近年来,水稻的食品安全在国内外也正逐渐受到重视。苏州市水稻籽粒 Cd、Pb 和 Cu 的含量均高于台湾地区^[15];与福建沿海相比^[16],Cu 和 Zn 较高,Pb 和 Cd 较低;与东部 H 市城市工业区周边的水稻重金属积累相比^[17],5 种重金属积累较低;与太湖流域的某地冶炼厂周边相比^[13],水稻籽粒 Cu、Pb、Cd、Cr 的积累均低于冶炼厂周边,Zn 则接近;与苏北 6 县市(丰县、沛县、铜山、睢宁、楚州和东海)相比^[12],研究区除水稻籽粒 Cr 低于苏北外,其余 4 种元素含量均高于苏北;合肥市郊 Cu、Cd 均高于苏州市,而 Pb 和 Cr 均低于研究区,而 Zn 接近^[18];重庆市 Cd 和 Pb 的平均含量高于

苏州市^[19];上海郊县 Cd、Zn 和 Pb 均高于研究区,Cr 和 Cu 低于苏州市^[20];沈阳郊区水稻重金属除 Pb 和 Cd 外,Cu、Zn 和 Cr 的含量要低于研究区域^[21];研究区 Pb 的含量接近于湖北省天门市优质大米产区,而 Cd 的含量高于天门市^[22]。

3.2 水稻籽粒重金属积累的影响因素

重金属通过各种途径进入土壤后,在土壤中具有隐蔽性、滞后性、不可逆性及复合性等特点,许多大田研究表明土壤中重金属总量及其有效性含量与作物中的积累量并不具有很强的相关性。张家港市的水稻 Cu 和 Pb 积累与土壤 Cu 和 Pb 总量之间呈现极显著正相关,而水稻 Cd 与土壤 Cd 全量之间相关性不显著,水稻重金属积累与土壤有效性重金属含量之间均不具有明显的相关性^[23]。

农作物对重金属的积累除与土壤重金属有关外,与土壤类型及企业分布具有相关性。土壤类型的影响体现为土壤组成和理化性质的不同。比较砂土和砂壤,发现 Cd 和 Pb 的生物可给性与粘土和水合铁锰氧化物含量有关^[7]。企业分布是重金属在农作物中富集的主要原因之一。如化工类企业周边的农作物 Cu 和 Cd 积累量高,而冶金类企业周边农作物 Pb 的积累量高^[23-24]。苏州市水稻籽粒重金属含量与土壤类型和企业分布进行方差分析结果显示(表 6),除水稻籽粒 Cu 在不同土壤类型上具有极显著差异 ($P<0.01$),在锥形土上大田和企业周边具有显著差异之外 ($P<0.05$),土壤类型和企业分布对水稻籽粒中 Pb、Cd、Cr 和 Zn 不具有明显影响。

作物对重金属的吸收还受到土壤 pH 及有机质的影响。pH 值越低,可浸提态重金属含量越高,作物的生物有效性越高。土壤有机质含量的高低影响着与重金属元素的吸附、络合性能,进而影响土壤中重金

表 5 苏州市水稻籽粒重金属潜在暴露量和潜在暴露风险

Table 5 Potential heavy metal exposure risk of rice grain in Suzhou City

县市	Pb		Cd		Cr		Zn	
	暴露量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	潜在暴露风险/ %	暴露量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	潜在暴露风险/ %	暴露量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	潜在暴露风险/ %	暴露量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	潜在暴露风险/ %
吴中	1.60	91	0.16	31	3.48	232	167.88	112
吴江	3.76	215	0.14	28	6.20	414	155.29	104
相城	4.79	274	0.19	38	3.76	251	161.87	108
昆山	2.07	118	0.20	40	4.23	282	146.08	97
太仓	1.32	75	0.22	44	3.76	251	147.58	98
常熟	1.69	97	0.23	46	2.73	182	180.10	120
张家港	1.32	75	0.35	71	—	—	—	—
平均	2.36	135	0.21	43	4.03	269	160	106

表 6 土壤类型和企业分布对水稻籽粒重金属影响及方差分析
Table 6 Analysis of variance for the effects of soil, industries and their interaction effects on heavy metal in rice in Suzhou City

元素	人为土		雏形土		土壤类型	企业分布	交互作用
	大田	企业周边	大田	企业周边			
Cu	3.64aA	3.56aA	4.26bB	4.78cB	0.000	0.085	0.021
Pb	0.18aA	0.19aA	0.17aA	0.19aA	0.341	0.883	0.911
Cd	20.78aA	20.88aA	18.39aA	21.49aA	0.409	0.622	0.601
Cr	0.42aA	0.36aA	0.27aA	0.32aA	0.479	0.977	0.707
Zn	17.74aA	17.25aA	17.48aA	18.79aA	0.257	0.951	0.536

注:表中除 Cd 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,其余元素单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;同一行不同字母表示不同土壤类型和利用状况之间的差异显著性,其中小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,大写字母表示在 0.01 水平上差异显著。

属的移动性及生物有效性。研究区所处的长江三角洲地区自 20 世纪 80 年代以来,土壤 pH 明显降低^[25],有机质明显升高^[26],从而有利于作物对重金属的积累,相应地对粮食安全产生威胁。

水稻籽粒重金属积累量也存在着基因型差异^[2-3]。本研究在进行调查采样时发现,水稻品种的分布在整个研究区没有地域性,种植品种比较单一,品种的选择比较随机,主要为中熟晚粳稻(常优 1 号)和早熟晚粳稻(武粳 15 号)两种,均出自同一品系,因此,可以忽略水稻品种对水稻重金属积累差异的影响。

3.3 水稻籽粒重金属风险评价

单项污染指数及综合污染指数评价结果均显示苏州市水稻籽粒具有 Pb 的污染风险。农作物中 Pb 的超标是我国乃至其他国家和地区面临的主要问题,苏州市也不例外,样点有 30%左右的超标率。在有关苏州市土壤重金属的研究中,除个别企业周边的土壤外,并未见土壤中重金属 Pb 大面积超标的报告。研究表明,虽然 Pb 在土壤中的活性态含量较大,但转化迁移进入作物籽粒的机率不大,其籽粒累积与土壤活性成分间的关系不明显^[27]。因此,作物籽粒累积的 Pb 很可能来自其他途径。其一可能是大气飘尘中 Pb 的点源污染造成的。Tiller 认为至少有 20%的汽车尾气排放 Pb 可扩散至 50 km 以外^[28],而苏州市交通干道间的距离一般不超过 10 km,因此,研究区农田均在汽车尾气排放的范围之内。其二,苏州市分布企业较多,分布比较破碎,一些企业气体污染物的排放可能是研究区作物 Pb 超标的另一个重要因素。我们对水稻籽粒样品超标点经过核对,大部分超标点均位于冶金企业周边。

食物暴露风险评价结果显示苏州市明显存在Cr

的食物暴露风险,这与单项污染指数评价及综合污染评价存在 Pb 污染风险的结果具有明显差异,一个可能的原因是我国制定的食品卫生质量标准中 Cr 限制量偏低而 Pb 的限制量偏高。

参考文献:

[1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients – food safety issues[J]. *Fiel Crop Res*, 1999, 60:143–163.

[2] 李坤权,刘建国,陆小龙,等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22:529–532.

LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environ-ment Science*, 2003, 22:529–532.

[3] 李正文,张艳玲,潘根兴,等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112–115.

LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(3):112–115.

[4] 邹飞波,张国平. 不同镉水平下大麦幼苗生长和镉及养分吸收的品种间差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12):1595–1599.

WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Differences between barley cultivars in seedling growth and in uptake of cadmium and nutrients under various Cd levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12):1595–1599.

[5] 吴启堂,陈 卢,王广寿,等. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104–107.

WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou, et al. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104–107.

[6] 何孟常,杨居荣. 水稻籽实中砷的结合形态特征及其稳定性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1141–1144.

HE Meng-chang, YANG Ju-rong. Characteristic of binding forms of arsenic in polluted rice seed and their stability[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9):1141–1144.

[7] 王友保,张 莉,沈章军,等. 铜尾矿库区土壤与植物中重金属形态分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12):2418–2422.

WANG You-bao, ZHANG Li, SHEN Zhang-jun, et al. Chemical forms of heavy metals in the soils and plants of copper tailings yard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2418–2422.

[8] 葛才林,杨小勇,孙锦荷,等. 重金属对水稻和小麦 DNA 甲基化水平的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2002, 28(6):419–424.

GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, SUN Jin-he, et al. Effects of heavy metal on the DNA methylation level in rice and wheat[J]. *Acta Photophysio-logica Sinica*, 2002, 28(6):419–424.

[9] 王凯荣,龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4):145–149.

WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genic rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4):145–149.

- [10] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 33–40.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—A case study of Taicang City in Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 33–40.
- [11] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 751–755.
- MA Cheng-ling, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 751–755.
- [12] 金亮, 李恋卿, 潘根兴, 等. 苏北地区土壤-水稻系统重金属分布及其食物安全风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 33–39.
- JIN Liang, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Distribution of heavy metals in the soil-rice system and food exposure risk assessment of north Jiangsu, China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 33–39.
- [13] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 60–63.
- LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 60–63.
- [14] 程旺大, 姚海根, 吴伟, 等. 土壤-水稻体系中的重金属污染及其控制[J]. 中国农业科技导报, 2005, 7(4): 51–54.
- CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, WU Wei, et al. Heavy metal pollution and its countermeasures in soil-rice system[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2005, 7(4): 51–54.
- [15] Lin Haw-tarn, Wong Sue-sun, Li Gwo-chen. Heavy metal content of rice and shellfish in Taiwan[J]. *Med Food Anal*, 2004, 12(2): 167–174.
- [16] 柯庆明, 梁康迳, 郑履端, 等. 福建省水稻稻米重金属污染的分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1918–1923.
- KE Qing-ming, LIANG Kang-kui, ZHENG Lv-duan, et al. Corresponding analysis on rice grain heavy metal pollution in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1918–1923.
- [17] 严莎, 凌其聪, 严森, 等. 城市工业区周边土壤-水稻系统中重金属的迁移累积特征[J]. 环境化学, 2008, 27(2): 226–230.
- YAN Sha, LING Qi-cong, YAN Sen, et al. Behaviors of heavy metals in soil-rice system around in industrial area around city[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(2): 226–230.
- [18] 王俊涛. 合肥市郊土壤-水稻系统中主要重金属元素的环境效应[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 41–52.
- WANG Jun-tao. Environmental effects of heavy metal elements in soil-rice plant system in Hefei suburb[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007: 41–52.
- [19] 刘萍, 张进忠. 重庆市主要农产品的重金属污染现状变化趋势及对策[J]. 微量元素与健康研究, 2005, 22(1): 31–33.
- LIU Ping, ZHANG Jin-zhong. Current situation, trend and counter-measure of heavy metals pollution in primary farm produces of Chongqing[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2005, 22(1): 31–33.
- [20] 庞金华. 上海郊区土壤和农作物中金属元素的污染评价[J]. 植物资源与环境, 1994, 3(1): 20–26.
- PANG Jin-hua. The evaluation of metal elements pollution in soils and crops in the suburbs of Shanghai[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1994, 3(1): 20–26.
- [21] 张勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 182–186.
- ZHANG Yong. Heavy metal pollution of soil and agricultural products in Shenyang suburbs: Current situation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(4): 182–186.
- [22] 沈体忠, 刘道红, 杨启悦, 等. 天门市优质大米的重金属污染状况及评价[J]. 湖北植保, 2007(6): 14–15.
- SHEN Ti-zhong, LIU Dao-hong, YANG Qi-yue, et al. Heavy metal pollution and assessment in rice in Tianmen city[J]. *Hubei Plant Protection*, 2007(6): 14–15.
- [23] 杨玉峰, 黄标, 齐雁冰, 等. 长江三角洲典型地区水稻籽粒中重金属含量及空间分布特征[J]. 土壤, 2009, 41(1): 42–48.
- YANG Yu-feng, HUANG Biao, QI Yan-bing, et al. Spatial variation of heavy metals in rice grains in a typical area of Yangtze River Delta region[J]. *Soils*, 2009, 41(1): 42–48.
- [24] 严连香. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属空间变异及其迁移转化规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 36–45.
- YAN Lian-xiang. Accumulation and transfer of heavy metal in the soil-crop systems around different point sources[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2007: 36–45.
- [25] 邵学新, 黄标, 顾志全, 等. 长三角经济高速发展地区土壤pH时空变化及其影响因素[J]. 岩石矿物地球化学通报, 2006, 26(2): 143–149.
- SHAO Xue-xin, HUANG Biao, GU Zhi-quan, et al. Spatial-temporal variation of pH values of soils in a rapid economic developing area in the Yangtze River Delta region and their causing factors[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 26(2): 143–149.
- [26] 齐雁冰, 黄标, 顾志全, 等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义[J]. 岩石矿物地球化学通报, 2008, 27(1): 50–56.
- QI Yan-bing, HUANG Biao, GU Zhi-quan, et al. Spatial and temporal variation of C/N ratios of agricultural soils in typical area of Yangtze Delta Region and its environmental significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 50–56.
- [27] 王昌全, 代天飞, 李冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 889–897.
- WANG Chang-quan, DAI Tian-fei, LI Bing, et al. The speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soils under the rice-wheat cultivation rotation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 889–897.
- [28] Tiller K G. The ecology relationship of the mainly heavy metal and poisonous heavy metal in soil[J]. *Progress in Soil Science*, 1993, 21(4): 28–31.