

甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析

李瑞琴^{1,2}, 于安芬^{1,2}, 白 滨^{1,2*}, 王 婧³

(1.甘肃省农业科学院畜牧与绿色农业研究所, 兰州 730070; 2.甘肃省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 兰州 730070; 3.甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘 要:采用野外采样和室内分析相结合的方法,以甘肃中部高原露地蔬菜代表类型的茄果类、叶菜类、鳞茎类、根茎类等蔬菜土壤为研究对象,以甘肃省环境监测中心站发布的土壤环境重金属背景值为主要评价参比值,分析土壤中重金属 Cd、Hg、As、Cu、Pb 和 Cr 的质量分数及污染特征,并采用地累积指数法和潜在生态危害指数法对研究区露地蔬菜土壤重金属污染现状进行生态风险评价。结果表明:研究区露地菜田土壤重金属的质量分数均高于评价参比值,重金属元素的潜在生态危害均属轻微,潜在生态危害程度顺序是 Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>As,对研究区域生态环境具有潜在影响的重金属元素主要是 Hg。

关键词:露地菜田土壤;重金属;生态风险评价;地累积指数

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0103-08 doi:10.11654/jaes.2013.01.016

Analysis on Current Situation and Potential Ecological Risk and the Characteristic of Heavy Metals Pollution of Soil in the Central Plateau of Gansu Province, China

LI Rui-qin^{1,2}, YU An-fen^{1,2}, BAI Bin^{1,2*}, WANG Jing³

(1. Institute of Green Agricultural and Animal & Pasture Improvement, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070 China; 3. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The concentrations and pollution characteristics of six heavy metals, such as Hg, Cr, Cd, As, Pb and Cu, in the open vegetable fields soil from solanaceous fruit vegetables, leafy vegetables, bulbs vegetables, roots and stems vegetables in the central plateau of Gansu Province were analyzed by using the method of field investigation and laboratory analyses. Geo-accumulation index and potential ecological risk index were used to evaluate the ecological risk assessment of heavy metal pollution. Our results showed that the concentrations of heavy metals in soil of open vegetable fields soil were higher than the evaluation of reference value. Those soils showed a light potential ecological risk, and the potential ecological risk was in the order of Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>As. Hg was the potential impact element for the ecological environment in the research area.

Keywords: open vegetable fields soil; heavy metals; ecological risk assessment; geo-accumulation index

近年来,在农业生产迅速发展的同时,我国的农业生态环境也遭到了严重的污染和破坏,其中土壤重

金属污染问题已成为当今环境科学研究的主要内容之一。土壤作为生物可利用重金属的一个重要蓄积库,其中所含的重金属可以通过食物链被植物、动物数十倍地富集,从而间接地危害人类健康,因此土壤重金属污染及其控制引起了广泛关注^[1]。目前,国内对于土壤重金属污染的研究主要集中于污灌区及原有工业污染较严重的流域^[2-12]和对城市不同功能区土壤重金属污染状况研究分析^[13-17],对于传统的典型农业区重金属潜在生态风险研究较少。因此,开展高原露地菜田土壤重金属生态风险评估研究对于保护农村

收稿日期:2012-05-25

基金项目:财政部国家社会公益项目绿色农业科学研究示范项目(2007-04);国家科技支撑项目“高原夏菜高效安全生产及保鲜加工关键技术研究示范”(2007BAD52B01);甘肃省科技重大专项(1102NKDJ031)

作者简介:李瑞琴(1969—),女,甘肃庆阳人,在读博士,高级实验师,主要从事农业环境及农产品质量安全研究工作。

E-mail: liruqin_524@163.com

* 通信作者:白 滨 E-mail: gsabaibin@sina.com

生态环境具有十分重要的意义。

甘肃高原露地菜田是全国高原夏菜的主要生产基地,研究区域地处高原、区域生态条件差异大、日照充足、气候冷凉、病虫害危害轻,但是随着农业产业化进程的加快,农村生态环境与健康风险凸显,主要表现在规模化养殖、农用化学品的不合理使用及农村城市化过程带来的一些环境问题。近年频发的农产品及环境污染事件,动摇了民众对原生态、纯天然环境质量的信心,再加上我国现行土壤环境重金属标准多,各套标准中限量指标要求各异,且有些差异很大,造成选用的参评标准不同,评价结果相差甚远。本研究选用与国家土壤背景值、绿色食品、无公害食品3套标准相比限量指标都最小的一套,即1993年甘肃省环境监测中心站研究发表的土壤环境重金属背景值为主要评价参比值^[18]。在野外调查和室内实验分析的基础上,研究分析了甘肃高原露地不同类型菜田土壤重金属质量分数变化动态,并评估土壤重金属潜在的生态风险,以发现不同人类活动影响下农田土壤重金属潜在生态风险,为政府决策提供依据,为民众选择放心农产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于中国大陆版图几何中心,处在东经 $102^{\circ}30'$ ~ $104^{\circ}30'$ 、北纬 $35^{\circ}5'$ ~ 38° 之间,平均海拔1670 m。年降水量290~360 mm,蒸发量1400 mm,平均气温 6.5°C ,无霜期平均140 d,为北温带半干旱大陆性半季风气候。研究对象为高原夏菜生产主要区域具有典型代表性的菜田和粮田土壤,菜田土壤类型主要有茄果类(辣椒、茄子等)、根茎类(胡萝卜、马铃薯等)、叶菜类(花椰菜、大白菜等)、鳞茎类(百合、洋葱等)及其他(豆类、瓜类),粮田作物主要是小杂粮。

1.2 样品的采集与处理

于2009年7月在位于研究区内高原夏菜主要生产区域(图1),兰州市榆中县、皋兰县及金昌市永昌县24个自然村的露地菜田采集土壤样品151个、粮田(小杂粮)采集土壤样品24个,共175个土壤样品,根据《土壤环境监测技术规范》的相关要求,用GPS定位仪记录各采样点的经纬度,采用对角线布点法采集0~20 cm的土壤,混合均匀后采用四分法取1 kg

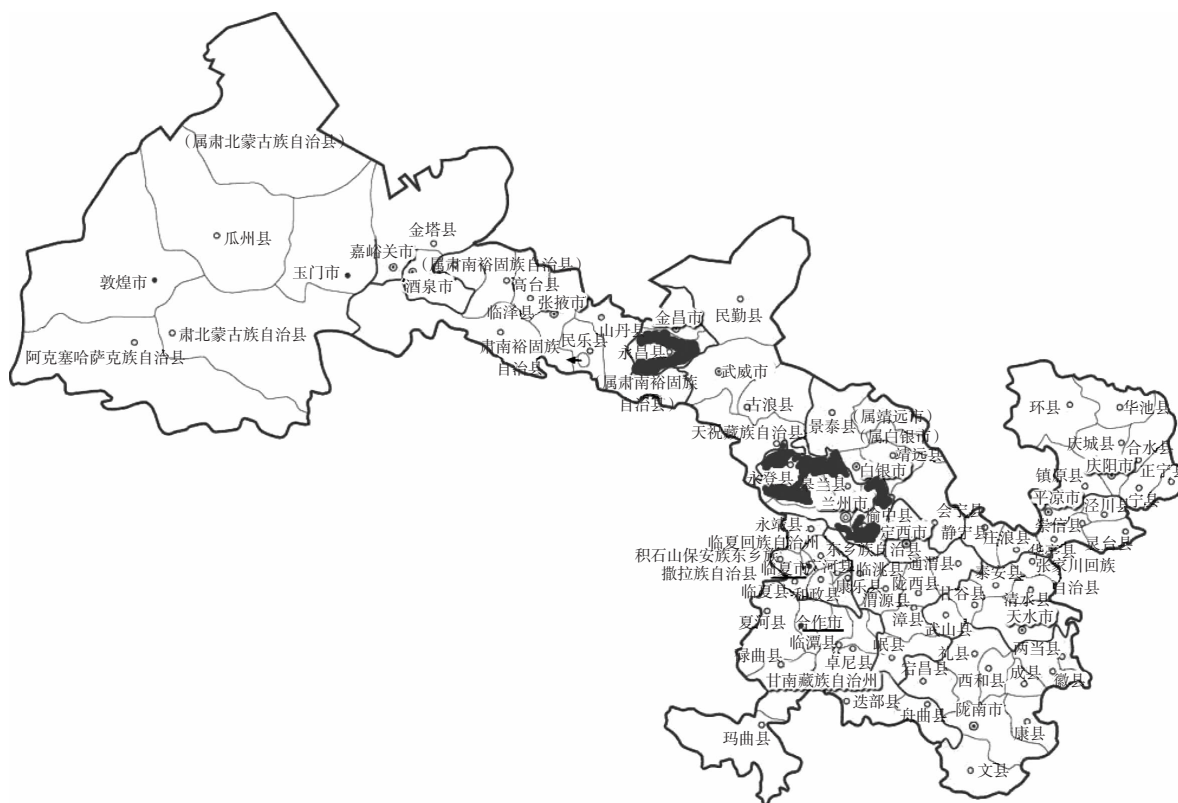


图1 取样地点分布图

Figure 1 Locations soil sampling sites in Gansu Province

装入样品袋,在实验室晾晒自然风干过筛制成土样。

1.3 测定与分析

样品采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸四酸消解法,铅、铬、铜采用火焰原子吸收法测定,镉用石墨炉原子吸收法测定,汞和砷采用原子荧光法测定。样品测试分析中每批次样品均带空白试验,同时每批次带省内土壤标准样,并对所有参试样品做 20%的平行双样测定,以确保测试分析结果准确可靠^[19-25]。

1.4 评价方法

近年来,众多的重金属污染评价方法问世,如指数法、动态评价法、生命周期评价法、基于 GIS 的土壤质量评价法、污染亏损率法、密切值法、模型法以及化学、生态学和毒理学的综合方法等^[26]。其中,指数法中的 Hakanson 潜在生态风险指数法得到了广泛应用^[27]。

生态风险评价是指确定人为活动或不利事情对生态环境产生危害或对生物个体、种群及生态系统产生不利影响的可能性分析过程。常用的重金属污染生态风险评价方法主要有地累积指数法和潜在生态风险指数法。地累积指数法在评价过程中主要考虑元素的富集作用,适用于评价单一元素的污染状况;而潜在生态风险指数法更侧重于多元素的协同作用,同时考虑了各重金属元素的毒性,适用于评价区域环境的潜在生态风险。

本研究既要了解单项重金属元素的污染状况,又要掌握区域内的潜在生态风险,土壤样本数也符合评价要求,因此综合应用地累积指数法和潜在生态风险指数法对研究区土壤重金属污染状况进行评价。

1.4.1 地累积指数法(Index of geo-accumulation)

地累积指数又称 Mull 指数,是 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量指标,其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)]$$

式中: C_n 是重金属元素的实测值; B_n 是该重金属元素的地球化学背景值; k 为考虑到成岩作用可能引起背景值波动而设定的常数(一般取值为 1.5)^[28]。

地累积指数的分级标准与污染程度的划分见表 1。

1.4.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(The potential ecological risk index)是瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出的,评价重金属潜在生态风险的一种相对快速、简便和标准的方法,综合考虑了多元素的协同作用、毒性水平、污染浓度及生态对重金属的敏感性等方面的因素^[29]。计算公式如下:

表 1 地累积指数法分级标准

Table 1 Standard for grading of geo-accumulation indices

风险级别 Level of risk	地累积指数(I_{geo}) Geo-accumulation indices	污染程度 Degree of pollution
0	≤ 0	清洁
1	0~1	轻度累积
2	1~2	偏中等累积
3	2~3	中等累积
4	3~4	偏重累积
5	4~5	重累积
6	>5	严重累积

$$C_f^i = C_i / C_n^i$$

式中: C_f^i 为单项重金属污染富集系数; C_i 、 C_n^i 分别为污染物的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、参比值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

单项重金属污染潜在生态危害系数(E_i^i)计算公式为:

$$E_i^i = T_i^i \times C_f^i$$

式中: T_i^i 为 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数^[30-31](表 2)。

重金属综合污染潜在生态风险指数(RI)计算公式为: $RI = \sum E_i^i$

表 2 重金属潜在生态危害指数的分级标准

Table 2 Standard for grading of potential ecological risk indices of heavy metals

风险级别 Level of risk	E_i^i	RI	潜在生态风险程度 Degree of potential ecological risk
A	≤ 40	≤ 150	低
B	40~80	150~300	中等
C	80~160	300~600	重
D	160~320	600~1200	严重
E	>320	>1200	极严重

注: E_i^i 为重金属 i 的潜在生态危害指数; RI 为多种重金属的潜在生态危害指数。

1.4.3 评价参比值

对于参比值的选择,各国学者的差别较大。有以当地土壤背景值为参比值^[31-32],或以国家土壤质量标准为参比值^[33]。本研究以 1993 年省环境监测中心站研究的全省土壤重金属背景值为主要评价参比值,应用该参比值能更确切地反映研究区土壤的实际污染程度,同时以国家绿色食品土壤环境质量标准为次要评价参比值进行对比(表 3)。

1.4.4 重金属毒性响应系数

重金属毒性响应系数代表重金属对人体和固体

表 3 重金属的参比值和毒性响应系数
Table 3 Reference values and toxicity coefficient of heavy metals

项目 (pH>7)Item	镉 Cd	汞 Hg	砷 As	铅 Pb	铬 Cr	铜 Cu
评价参比值/mg·kg ⁻¹	0.087	0.017	12.58	22.26	73.01	24.46
国家土壤环境背景值/mg·kg ⁻¹	1	1.5	40	500	300	400
绿色食品标准/mg·kg ⁻¹	0.4	0.35	20	50	120	60
无公害标准/mg·kg ⁻¹	0.6	1	20	350	250	200
毒性响应系数(T _i)	30	40	10	5	2	5

物质系统的危害。由于重金属的沉积作用及对固体物质的亲和作用,使得毒性和稀少性之间存在着一种比例关系,根据 Hakanson 的“元素丰度原则”和“元素释放度”及参考其他学者的研究成果来确定重金属毒性系数^[31-32](表 3),它主要反映重金属的毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度。

1.5 数据处理与统计方法

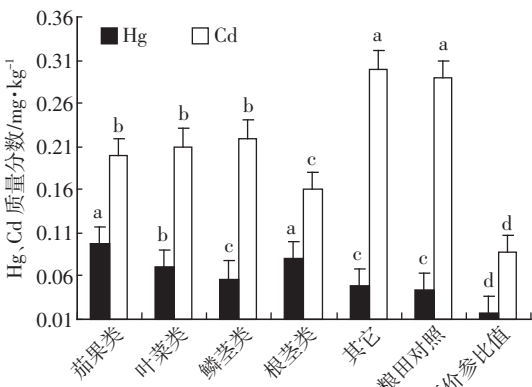
数据采用 Excel 和 SPSS13.0 进行统计分析和 LSD 多重比较,分析各处理之间差异的显著性。

2 结果与讨论

2.1 露地各类菜田土壤重金属的分布特征

以 1993 年省环境监测中心站研究发布的全省土壤重金属背景值为主要评价参比值,比较分析露地菜田土壤重金属,Cd、Hg、As、Pb、Cr 超标率分别占样本总数的 90.5%、99.3%、10.9%、89.1%、17.7%。

由表 4、图 2~图 5 可知,露地菜田土壤重金属除 As 较低外,其他 5 种重金属的质量分数均高于评价参比值,存在不同程度的富集和污染。其中 Hg 的差异最大,其次为 Cd、Pb、Cr。



不同字母表示不同土壤类型之间差异显著(P<0.05)

图 2 露地菜田土壤 Hg、Cd 平均质量分数

Figure 2 The comparison of mean of Hg, Cd in the vegetable soils of research area

不同类型土壤重金属质量分数差异很大,茄果类的 Cr 和 Hg 大于其他类型菜田土壤,除 Cu、Cd 外,菜田土壤 Hg、As、Pb、Cr 平均质量分数高于粮田。

研究区各类型菜田土壤重金属的质量分数均低于国家绿色食品土壤环境质量重金属的限量指标,符合国家绿色食品土壤环境质量标准要求。

表 4 露地各类菜田土壤重金属分布统计分析(mg·kg⁻¹)

Table 4 The concentrations and enrichment coefficient of heavy metals in the vegetable soils of research area(mg·kg⁻¹)

土壤类型 Soil type	样本数 Sample number	项目 Item	镉 Cd	汞 Hg	砷 As	铜 Cu	铅 Pb	铬 Cr
茄果类	n=15	范围	0.073~0.274	0.054~0.194	2.46~6.91	4.74~35.31	25.20~72.19	45.80~400.90
		标准差	0.09	0.05	1.89	15.60	20.78	172.44
叶菜类	n=45	范围	0.16~0.29	0.029~0.167	4.68~12.03	9.346~28.25	22.26~86.89	60.69~261.04
		标准差	0.04	0.03	2.24	6.13	14.61	52.89
鳞茎类	n=18	范围	0.16~0.26	0.029~0.074	4.68~12.0	19.25~26.88	22.26~68.04	76.8~171.0
		标准差	0.04	0.02	2.85	2.64	16.35	33.50
根茎类	n=33	范围	0.016~0.38	0.033~0.147	0.94~15.6	17.3~32.6	20.39~96.5	54.84~251.0
		标准差	0.09	0.04	2.58	3.60	21.81	43.45
其他	n=40	范围	0.073~0.38	0.046~0.054	3.41~5.84	22.39~34.9	25.2~45.2	45.8~63.88
		标准差	0.15	0.00	1.22	5.67	8.70	8.83
对照	n=24	范围	0.205~0.328	0.028~0.054	5.22~9.4	30.27~36.18	21.71~58.49	51.67~69.08
		标准差	0.04	0.01	1.34	2.00	11.89	5.40
超标率			90.48%	99.32%	10.88%	46.26%	89.12%	17.69%

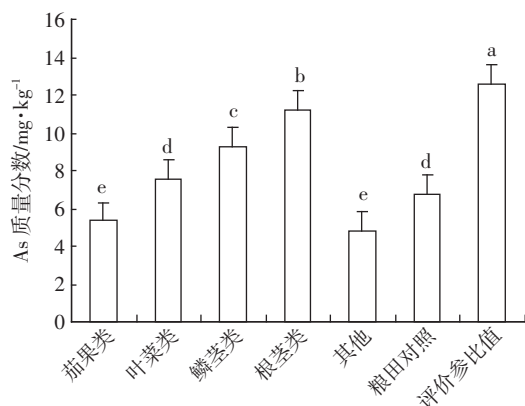


图3 露地菜田土壤 As 平均质量分数

Figure 3 The comparison of mean of As in the vegetable soils of research area

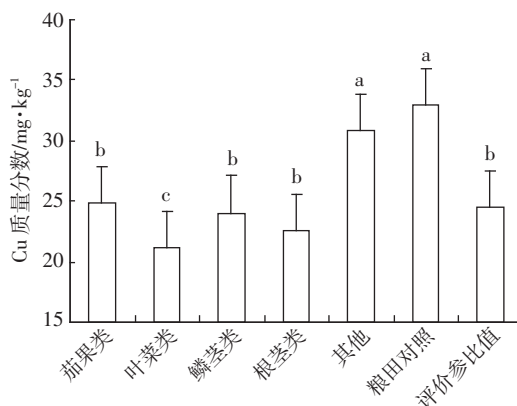


图5 露地菜田土壤 Cu 平均质量分数

Figure 5 The comparison of mean of Cu in the vegetable soils of research area

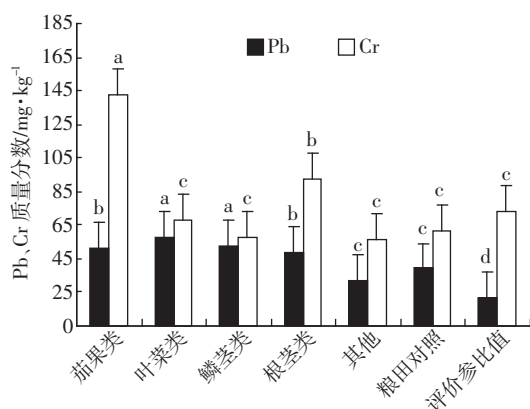


图4 露地菜田土壤 Pb、Cr 平均质量分数

Figure 4 The comparison of mean of Pb, Cr in the vegetable soils of research area

2.2 地累积指数法评价

研究区露地菜田土壤中各元素的地累积指数统计分析见表5,结合地累积指数法污染程度及风险分级标准可知:对元素 As, Cu, Cr, 除茄果类蔬菜土壤中 Cr 存在轻度污染外,其余各采样点土壤环境中 3 元

素均未形成污染,其生态风险级别为 0 级。

对元素 Cd, Hg 和 Pb, 露地菜田各类型采样土壤均存在一定程度的累积。其中,元素 Hg 累积最严重,累积程度为中等累积,研究区露地菜田平均地累积指数为 1.43,风险级别为 2 级;其次是 Cd 和 Pb,平均累积程度均为轻度累积,风险级别均为 1 级。采样区 6 种重金属元素的风险级别依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>As。

与粮田相比,菜田土壤平均 Hg、Pb 的累积指数高出 1 倍。

2.3 潜在生态风险指数法评价

研究区露地菜田土壤中各元素的单项潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数(RI)见表6。研究区土壤重金属的潜在生态风险危害程度为中等,级别为 B 级,各元素潜在生态危害程度依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>As。

从单元素角度分析可知:Hg 的潜在生态危害最强,茄果类、叶菜、根茎类蔬菜土壤的风险级别达到 D 级,生态危害程度极强,鳞茎类蔬菜和其他蔬菜土壤

表5 研究区露地菜田土壤重金属地累积指数(I_{geo})及累积等级(R)Table 5 Geo-accumulation indexes(I_{geo}) and accumulation levels(R) of heavy metals in the vegetable soils of research area

土壤类型 Soil type	Cd		Hg		As		Cu		Pb		Cr	
	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R
茄果类	0.59	1	1.93	2	-1.83	0	-0.55	0	0.62	1	0.38	1
叶菜类	0.71	1	1.47	2	-1.32	0	-0.78	0	0.79	1	-0.68	0
鳞茎类	0.74	1	1.17	2	-1.02	0	-0.60	0	0.66	1	-0.92	0
根茎类	0.26	1	1.66	2	-0.75	0	-0.69	0	0.54	1	-0.24	0
其他	1.18	2	0.94	1	-1.97	0	-0.24	0	-0.03	0	-0.95	0
菜田平均	0.70	1	1.43	2	-1.38	0	-0.57	0	0.52	1	-0.48	0
粮田对照	1.16	2	0.72	1	-1.47	0	-0.14	0	0.23	1	-0.82	0

表 6 研究区露地菜田土壤重金属潜在生态危害系数(E_r)和潜在生态风险指数(RI)

Table 6 Grading of potential ecological risk indices of heavy metals in the vegetable soils of research area

土壤类型 Soil type	Cd		Hg		As		Cu		Pb		Cr		E_r	RI
	E_r	RI	E_r	RI	E_r	RI	E_r	RI	E_r	RI	E_r	RI		
茄果类	67.59	B	228.47	D	4.23	A	5.08	A	11.53	A	3.91	A	320.81	C
叶菜类	73.59	B	166.43	D	6.01	A	4.34	A	12.98	A	0.00	A	263.35	B
鳞茎类	75.17	B	134.64	C	7.40	A	4.92	A	11.81	A	0.00	A	233.93	B
根茎类	53.80	B	190.07	D	8.90	A	4.60	A	10.91	A	2.54	A	270.82	B
其他	101.98	C	115.47	C	3.83	A	6.29	A	7.32	A	1.55	A	236.45	B
菜田平均	74.43	B	167.02	D	6.07	A	5.05	A	10.91	A	1.60	A	265.07	B
粮田对照	100.88	C	98.54	C	5.40	A	6.74	A	8.80	A	1.70	A	222.06	B

的风险级别为 C 级,生态危害程度强;其次是 Cd,茄果类、叶菜、鳞茎类及根茎类蔬菜土壤的风险级别均为 B 级,生态危害程度轻微,其风险级别和生态危害程度均低于其他蔬菜和对照粮食作物土壤。

从多元素角度综合分析可知:研究区重金属污染的潜在生态风险值相对较低,只有茄果类蔬菜的潜在生态危害程度达到强,其余类型土壤的潜在生态危害程度均为轻微。

3 结论

本研究以 1993 年甘肃省环境监测中心站研究发表的土壤环境重金属背景值为主要评价参比值^[18]。该背景值与国家土壤环境重金属背景值(表 3)相比^[31],低了几倍。以本研究中重金属元素 Hg 为例,各类菜田土壤样品中 Hg 的质量分数为 0.043~0.097 mg·kg⁻¹,其评价参比值即本研究中选择的土壤环境背景值为 0.017,国家土壤环境背景值中 Hg 为 1.5,绿色食品土壤环境质量标准中 Hg 的限量指标为 0.35 (旱田)和 0.4(水田)。以国家绿色食品土壤环境质量标准为评价参比值^[27],采用地累积指数法进行评价时,研究区土壤环境中各重金属元素质量分数均小于标准值,未形成污染,其生态风险级别为 0 级;采用潜在生态风险法进行评价时,研究区土壤环境中各重金属元素的潜在生态风险级别均为 A 级(危害程度轻微)。由此可见,农田土壤重金属污染评价中评价参比值的选择,对其评价结果影响甚大。

研究区露地菜田土壤重金属污染的潜在生态风险值相对较低,只有茄果类蔬菜的生态危害程度达到强,其余类型土壤的生态危害程度均为轻微。在露地蔬菜种植区域应关注 Hg 的潜在生态危害,特别要定期追踪监测茄果类、叶菜、根茎类蔬菜土壤中 Hg 的残留动态。

菜田土壤 Hg、As、Pb、Cr 的平均质量分数均高于粮田土壤,其中 Hg、Pb 的累积指数比粮田高出 1 倍。这与曾希柏^[34]、罗永清等^[35]的研究结果一致。随着市场需求量的增加及对经济效益的追求,同粮食作物相比较,蔬菜作物对土地的利用强度更大,化肥、农药等投入水平更高,这可能是造成研究区菜田土壤重金属高于粮田的原因。

参考文献:

- [1] 陈怀满,郑春荣,等. 中国土壤重金属污染现状与防治对策[J]. 人类环境杂志, 1999, 28(2): 130-134.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, et al. Heavy metal pollution in soils in China: Status and countermeasures[J]. *Journal of the Hunman Environment*, 1999, 28(2): 130-134.
- [2] 马 婷,赵大勇,曾 巾,等. 南京主要湖泊表层沉积物中重金属污染潜在生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6): 37-42.
MA Ting, ZHAO Da-yong, ZENG Jing, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollutants in surface sediments of the lakes in Nanjing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(6): 37-42.
- [3] 贾振邦,梁 涛,林建枝,等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 485-492.
JIA Zhen-bang, LIANG Tao, LIN Jian-zhi, et al. Study on heavy metal contamination and potential[J]. *Acta Scicentiarum Naturalum Universitatis Pekinesis*, 1997, 33(4): 485-492.
- [4] 兰天水,林 健,陈建安,等. 公路旁土壤中重金属污染分布及潜在生态危害的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2003, 9(1): 4-6.
LAN Tian-shui, LIN Jian, CHEN Jian-an, et al. Study on the heavy metal contamination in roadside soil and the ecological hazard[J]. *Strait Journal of Preventive Medicine*, 2003, 9(1): 4-6.
- [5] 张 民,龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 85-93.
ZHANG Min, GONG Zi-tong. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 85-93.
- [6] 易 秀,谷晓静,侯燕卿,等. 泾惠渠灌区土壤质量变化规律及评价

- 研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6):217-221.
- YI Xiu, GU Xiao-jing, HOU Yan-qing, et al. Evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of Jinghuiqu irrigation district of Shanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(6):217-221.
- [7] 何孟常, 王子健, 汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学, 1999, 20(1):7-10.
- HE Meng-chang, WANG Zi-jian, TANG Hong-xiao. Pollution and ecological risk assessment for heavy metals in sediments of Le'an River[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(1):7-10.
- [8] 李朝生, 王新伟, 何江, 等. 河流沉积物重金属潜在生态风险及其空间分异:以黄河包头段为例[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):308-311.
- LI Chao-sheng, WANG Xin-wei, HE Jiang, et al. Potential ecological risk and its spatial variance of heavy metals in river sediments: A Case study on the Baotou section of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):308-311.
- [9] 黄宏, 郁亚娟, 王晓栋, 等. 淮河沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(3):207-232.
- HUANG Hong, YU Ya-juan, WANG Xiao-dong, et al. Pollution of heavy metals in surface sediments from Huaihe River (Jiangsu section) and its assessment of potential ecological risk[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2004, 26(3):207-232.
- [10] 黎莉莉, 张晟, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4):470-473.
- LI Li-li, ZHANG Sheng, LIU Jing-hong, et al. Evaluation of potential ecological risk caused by heavy metals in the water-level-fluctuating zone of the three Gorges reservoir area[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2005, 27(4):470-473.
- [11] 王晓芳, 罗立强. 铅锌银矿区蔬菜中重金属吸收特征及分布规律[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):143-148.
- WANG Xiao-fang, LUO Li-qiang. Uptake of heavy metal in vegetables grown in Pb-Zn-Ag mine, Nanjing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1):143-148.
- [12] 魏敏, 刘新, 陈朝琼, 等. 攀钢冶炼渣堆土壤与优势植物的重金属含量[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2931-2936.
- WEI Min, LIU Xin, CHEN Zhao-qiong, et al. The concentration of heavy metals in soil and dominant plants growing on spoiled heap from steel refinery[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2931-2936.
- [13] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京不同功能区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24(3):105-111.
- WU Xin-min, LI Lian-qin, PAN Gen-xing, et al. Soil pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(3):105-111.
- [14] 章明奎, 符娟林, 黄昌勇. 杭州市居民区土壤重金属的化学特性及其与酸缓冲性的关系[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):44-50.
- ZHANG Ming-kui, FU Juan-lin, HUANG Chang-yong. Chemical characteristics of heavy metals and their relationships with acid buffer capacity of soils in residential sites in Hangzhou city, Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):44-50.
- [15] 林键, 张志超, 张琦, 等. 地累积指数法对公路旁土壤中重金属污染的评价[J]. 实用预防医学, 2001, 8(5):339-340.
- LIN Jian, ZHANG Zhi-chao, ZHANG Qi, et al. Assessment on pollution of heavy metal in soil along road with method of the index of geoaccumulation[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2001, 8(5):339-340.
- [16] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005(1):111-116.
- ZHAO Qin-na, XU Qi-xin, YANG Kai. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2005(1):111-116.
- [17] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 北京城市边缘区土壤重金属污染物分布特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):149-152.
- CHEN Jing-zhong, CHEN Jie, XIE Xue-jian, et al. The distribution character of heavy metals in peri-urban area of Beijing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):149-152.
- [18] 王生朴, 连兵. 甘肃省土壤环境背景值特征及其分布规律[J]. 甘肃环境研究与监测, 1993, 23(3):1-7.
- WANG Sheng-pu, LIAN Bing. Soil environmental background values in Gansu Province characteristics and its distribution rules[J]. *Gansu Environmental Study And Monitoring*, 1993, 23(3):1-7.
- [19] GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].
- GB 15618—1995. Soil Environmental quality standards[S].
- [20] HJ/T 166—2004. 土壤环境监测技术规范[S].
- HJ/T 166—2004. The technical specification for soil environmental monitoring[S].
- [21] GBT 23739—2009. 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法[S].
- GBT 23739—2009. Soil quality—analysis of available lead and cadmium contents in soils: Atomic absorption spectrometry[S].
- [22] HJ 491—2009. 土壤 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
- HJ 491—2009. Soil quality—determination of total chromium: Flame atomic absorption spectrometry[S].
- [23] GB/T 17138—1997. 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
- GB/T 17138—1997. Soil Quality—determination of copper, zinc: Flame Atomic absorption spectrometry[S].
- [24] GB/T 17141—1997. 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- GB/T 17141—1997. Soil quality—determination of lead, cadmium: Graphite furnace atomic absorption spectrometry[S].
- [25] GB/T 22105.3—2008. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分:土壤中总汞的测定[S].
- GB/T 22105.3—2008. Soil Quality—analysis of total mercury, arsenic and lead contents—Atomic fluorescence spectrometry—Part 1: Analysis of total mercury contents in soils[S].
- [26] GB/T 22105.3—2008. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分:土壤中总砷的测定[S].
- GB/T 22105.3—2008. Soil quality—Analysis of total mercury, arsenic and lead contents—Atomic fluorescence spectrometry—Part 2: Analysis of total arsenic contents in soils[S].

- [27] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [28] 周秀艳, 王恩德. 辽东湾潮间带底质重金属污染地累积指数评价[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(2):22-24.
- ZHOU Xiu-yan, WANG En-de. Method on how to apply index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution as result of inter-tidal sediments in Liaodong bay[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(2):22-24.
- [29] 徐 玮, 吕 宾, 储金字, 等. 镇江市老城区不同功能区地表灰尘重金属污染评价[J]. 环境化学, 2012, 31(2):182-188.
- XU Wei, LÜ Bin, CHU Jin-yu, et al. Assessment of heavy metal contamination in road-deposited sediment from different functional district of Zhenjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(2):182-188.
- [30] 姬亚芹, 朱 坦, 冯银厂, 等. 应用地质累积指数分析城市颗粒物源解析土壤风沙尘的污染[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):949-953.
- JI Ya-qin, ZHU Tan, FENG Yin-chang, et al. Pollution analysis of soil dusts of source apportionment using geoaccumulation Index (I_{geo}) in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):949-953.
- [31] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987:6-36.
- XIA Zeng-lu, LI Sen-zhao, LI Ting-fang, et al. Background values of elements in soils and its research methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987:6-36.
- [32] GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].
- GB 15618—1995. Environmental quality standard for soils[S].
- [33] NY/T 391—2000. 绿色食品 产地环境质量标准[S].
- NY/T 391—2000. Environmental technical terms for green food production area[S].
- [34] 曾希柏, 李莲芳, 白玲玉, 等. 山东寿光农业利用方式对土壤砷累积的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):310-316.
- ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, BAI Ling-yu, et al. Arsenic accumulation in different agricultural soils in Shouguang of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):310-316.
- [35] 罗永清, 陈银萍, 陶 玲, 等. 兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1):98-104.
- LUO Yong-qing, CHEN Yin-ping, TAO Ling, et al. Investigation and evaluation on heavy metals pollution in farmland soil in Lanzhou City [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2011, 46(1):98-104.

欢迎订阅 2013 年 《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》(原《农业环境保护》)是由农业部主管,农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊,列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入选《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录,如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ),美国《剑桥科学文摘社网站:水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,224 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外,编辑部存有 2010 年以前的各卷合订本,欢迎选购。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮编:300191

电话:(022)23674336

传真:(022)23674336

邮箱:caep@vip.163.com

网址:http://www.aes.org.cn