

大冶矿区周边农田土壤和油菜重金属污染特征研究

孙清斌¹, 尹春芹^{1*}, 邓金锋¹, 熊巧²

(1.黄石理工学院环境科学与工程学院, 湖北 黄石 435003; 2.武汉理工大学资环学院, 武汉 430070)

摘要:以大冶典型铜矿区为中心,辐射周边农田,探索农田土壤重金属污染特征及重金属在油菜中的积累变化规律。结果表明,以湖北省土壤背景值进行评价,土壤受到重金属不同程度的污染,其中Cd严重超标,Cu次之;采用国家二级标准进行评价,Zn、Cr和Pb未对土壤造成污染。进行内梅罗综合污染指数法评价发现,以土壤背景值为评价标准,各采样点均达到重金属严重污染水平;以国家二级标准评价时,只有2号采样点土壤属于中度污染水平,其他样点土壤都受到了较为严重的重金属污染。矿区农田油菜各部位重金属含量变化幅度较大,包括Cu、Pb、Zn、Cd和Co在内的5种重金属含量分布规律都是茎叶>籽粒≈根,Mn则是籽粒>茎叶>根。油菜地上部植株中Cu、Pb、Zn、Cd含量均超出食品卫生标准最高限值,且Cd、Pb超标倍数远大于Cu、Zn。富集系数变化规律为Mn>Zn>Cd>Ni>Cu>Pb>>Co。

关键词:矿区;农田土壤;重金属;油菜

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0085-07

Investigation on the Heavy Metal Contamination of Farmland Soil and *Brassica Campestris* Nearby Mining Areas in Daye City, China

SUN Qing-bin¹, YIN Chun-qin^{1*}, DENG Jin-feng¹, XIONG Qiao²

(1.College of Environmental Science and Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Many mining enterprises are distributed in Daye City because of the abundant mineral resources. With the development of industrialization, the environments nearby these enterprises were destroyed severely. Investigation was conducted to evaluate the heavy metal contamination of farmland soil and *Brassica campestris* plant around typical copper mining areas in Daye City. The results showed that the soils were contaminated with different heavy metals compared with soil natural background values of Hubei Province, and among them cadmium (Cd) was mostly contaminated, followed by copper (Cu) as second severely contaminated element. While using China National Standard (CNS) as an evaluation standard, the soils were contaminated with heavy metals except for Zn, Cr and Pb. Nemorow integrative index method was further employed to evaluate the heavy metal contamination level, and the result showed that all the tested soils were severely contaminated based on both soil natural background values and CNS as evaluation standard, with soil sample No. 2 as an exception, which was subjected to the moderate pollution level. The heavy metal concentrations varied in different parts of *Brassica campestris*, with a character of leaf>grain≈root for Cu, Pb, Zn, Cd, and Co, and seed>leaf>root for Mn. The concentrations of Cd, Pb, Cu and Zn in *Brassica campestris* were all exceeded the national food sanitation standard, and the exceed level for Cd and Pb were higher than Cu and Zn. The order of the enrichment coefficients was Mn>Zn>Cd>Ni>Cu>Pb>>Co.

Keywords: mining area; farmland soil; heavy metal; *brassica campestris*

收稿日期:2011-06-09

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目(Q20093001);湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B类)(B20093003);黄石理工学院院级引进人才项目(10yz04R)

作者简介:孙清斌(1977—),男,河南新乡人,博士,讲师,研究方向为环境生态与生物地球化学过程。E-mail:Samuel614@126.com

* 通讯作者:尹春芹 E-mail:yinchunqin@126.com

人类从事采矿业已有数千年的历史,开采矿藏给人类带来了巨大财富。矿产资源的开发对于国民经济的发展具有十分重要的意义^[1-2],然而矿山的开采也引起矿区及其周围生态环境的污染。为了保护生态资源,有效地利用生态资源的再生性,促进社会的可持续发展,对矿区土地进行复垦、防治土壤重金属污染的研究已引起国内外学者的广泛关注^[2-4]。合理地分析与评价矿区土壤环境质量,全面掌握土壤的污染现状是矿区土壤污染治理、生态恢复必不可少的前提工作^[5-6]。

湖北省大冶市矿藏资源丰富,素有“百里黄金地,江南聚宝盆”之美誉,是世界青铜文化发祥地,中国近代工业的摇篮,历来是工业重镇。境内有多家采矿企业,所涉及的金属种类繁多,矿产资源的开发带来社会繁荣与进步的同时,也给环境带来破坏,特别是矿区农田土壤所受到的影响最大。土壤-粮食-蔬菜系统是污染物进入食物链的主要渠道之一,该系统的污染直接关系到土壤环境与粮食和蔬菜的质量安全,进而影响到整个市区消费群体的身体健康。因此,本研究以大冶典型铜矿区为中心,辐射周边农田,以湖北省土壤自然背景值和 GB 15168—1995《土壤环境质量标准》为依据,深入调查矿区土壤环境中重金属元素(包括 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Ni 和 Mn)的污染现状,并采用单因子指数法和 Nemerow 综合指数法进行评价及分析,同时探索重金属在油菜中的积累特征,旨在为矿区农田土壤安全利用及农产品安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大冶市地处幕阜山脉北侧的边缘丘陵地带,地形分布为南山、北丘、东西湖,南高、北低、东西平,海拔高度 120~200 m。当地年平均气温 16.9℃,极端最高气温 40.1℃,极端最低气温 -10℃,年均无霜期 261 d,年均降水量 1 385.8 mm。本研究的采样点主要设置在大冶市有代表性的矿山(铜绿山、王天塹和铜山口等)以及相邻交通干线附近的油菜种植田。

1.2 样品采集和预处理

用“S”型 10 点采样法取土混合,采样深度为 0~20 cm 的表层土壤,同时采集对应植物样品。试验共设置 16 个采样点(图 1)。

土样取回后,风干,除去砾石和植物残根,采用四分法,逐级过筛,并将过筛后样品贮存在干燥器中备

用。油菜样品用蒸馏水洗净表面土壤和杂质,擦干表面附着水,采用四分法,分别取油菜的根、茎叶和籽粒样品,称重后装入信封中,在 105℃杀青 15 min,75℃烘干至恒重,粉碎,贮存于干燥器中备用。

1.3 样品的消解与分析

土壤测定项目包括 pH 以及 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Ni 和 Mn 8 种重金属含量。油菜测定项目包括 Cu、Pb、Zn、Cd、Co、Ni 和 Mn 7 种重金属含量。

土壤样品(过 10 目筛)pH 值测定方法参见 NY/T 1377—2007。土壤和植物样品(过 100 目筛)重金属测定的消解方法参见文献[7]。样品经王水消煮后,用超纯水(Milli-Q Academic A10,美国)定容,过滤至塑料瓶中待测。同时做试剂空白,方法同上。土壤和植物样品中重金属含量用原子吸收分光光度计(Varian AA240FS,美国)检测。

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属分布状况

本研究采用常用的单项因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法进行现状评价^[8]。选用湖北省土壤自然背景值和国家土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)作为评价标准^[8-9](表 1),对大冶市矿区周边农田土壤重金属的环境质量状况做出评价。

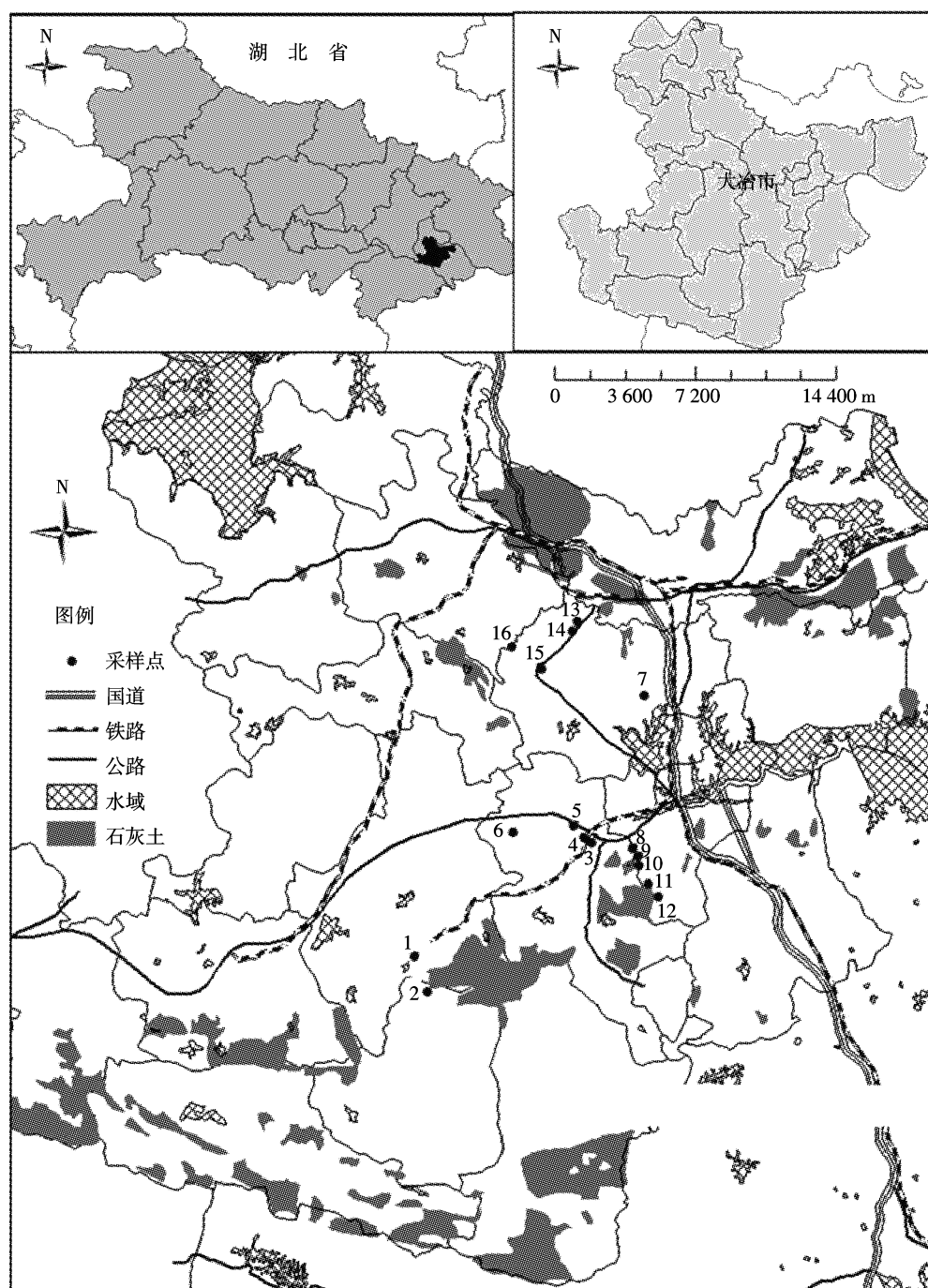
分别以 16 个采样点的 8 种金属元素土壤监测结果,根据湖北省土壤环境背景值进行单项因子污染指数评价(表 2)。以湖北省土壤背景值作为评价标准,8 种重金属的污染指数值都大于 1.0,表示该地区土壤已受到重金属的污染。不同重金属对各自采样点所造成的污染程度存在较大差异,从污染指数上看 Cd>>Cu>Pb>Zn>Co>Mn>Ni>Cr。其中,无论是哪个采样点

表 1 土壤重金属污染评价标准(mg·kg⁻¹)

Table 1 The evaluated standards of heavy metal concentrations in soil environment(mg·kg⁻¹)

重金属	国标二级(GB 15618—1995)			湖北省土壤背景值*
	pH<6.5	6.5<pH<7.5	>7.5	
Cd	0.3	0.6	1.0	0.172
Cu	50	100	100	30.7
Pb	250	300	350	26.7
Cr(旱地)	150	200	250	86.0
Zn	200	250	300	83.6
Ni	40	50	60	37.3
Co	—	—	—	15.4
Mn	—	—	—	712

注:*引自《中国土壤元素背景值》^[10]。

图1 大冶矿区农田土壤调查采样点($n=16$)Figure 1 Sampling sites of farm soils in Daye mining area($n=16$)

土壤中的 Cd 都严重超标,平均污染指数达到 23.56,远大于标准值 1.0。Cu 的污染指数紧随其后,平均值为 5.89,这主要是因为 1、2、4 号样点污染指数较高所致。1、2 号样点位于铜山口矿区且附近有公路,是铜矿运输的必经之路;4 号样点处在公路和铁路交汇之处,距离矿区也较近,所采集的铜矿无论是何种运输途径都可能对其造成不利影响。Pb 的污染指数平均

值为 4.47,也是较高的。其他 5 种重金属(Zn、Co、Mn、Ni 和 Cr) 的污染指数的平均值在 1.07~2.11 之间,污染程度较低。

鉴于国家土壤环境质量标准中尚无对 Co 和 Mn 两种元素做出标准限量,本研究只对另外 6 种元素进行了污染指数评价,其评价结果见表 3。由表 3 可知,尽管所分析的 6 种重金属各自采样点污染程度也同

样存在较大差异,但污染变化趋势与表 2 相比不完全一致,从污染指数上看 $Cd \gg Cu > Ni > Zn > Cr > Pb$ 。说明此种评价标准条件下,Cd 污染依然最严重,且平均污染指数值(10.37)远大于其他 5 种重金属的指数值。这一结果与黄顺生对南京郊区菜地土壤 Cd 污染水平的调查研究较为一致^[1]。之所以出现此现象,很可能是大气降尘、灌溉水及化肥施用共同作用的结果。特别是研究区周围矿业活动频繁,大气降尘量较大,含有不少的重金属元素,由大气降尘进入农田土壤进而影响表层土壤 Cd 含量水平。Cu 的污染程度也较严重,平均污染指数值达到 2.79。与以土壤背景值评价不同的是,采用国家二级标准评价时,原本污染程度不高的 Ni 污染指数上升至第 3 位,从污染指数来看,造成了重金属的污染;而 Zn、Cr 和 Pb 以国家二级标准衡量,其平均污染指数分别为 0.78、0.55 和 0.42,表示未受到污染。

由上面分析可知,基于自然背景值和国家二级标准,针对矿区农田土壤中的重金属含量都得出了土壤受到重金属不同程度污染的评价结果。这可能是多年来大冶矿业发达,在促进经济发展的同时,也对当地农田土壤带来了很大的影响,致使土壤重金属含量有了不同程度的增加。

对各样点进行内梅罗综合污染指数法评价,以湖

北省土壤背景值和国家土壤环境质量二级标准为评价标准的土壤重金属综合污染指数分布见图 2。以土壤背景值为评价标准,重金属综合污染指数值全都大于 9.77,污染水平属于重污染(标准是 $P_{综}>3.0$),表示土壤中作物均受到污染,且已相当严重。采样点 3、5、11、12 和 14 的综合污染指数甚至超过了 20,应该引起有关环保和政府部门的注意。以国家二级标准为评价标准,土壤重金属的综合污染指数值只有采样点 2 小于 3.0,属于中度污染水平,而其他采样点综合污染指数值都大于 3.0。全部样点的综合污染指数平均值为 7.9,说明以国家二级标准来衡量,大冶矿区周边农田土壤也都受到了较为严重的重金属污染。

土壤是人类赖以生存的基础,一旦受到重金属污染将会通过一系列化学、生物作用进入农产品中,人们如果食用了这些重金属超标的产品,将会危害身体健康。由国家环境保护局所制定的土壤环境质量标准(GB 15618—1995)对 Cd、Cu、Ni、Zn、Cr、Pb 等重金属分级标准都给予了比较明确的规定,但是针对其他可能会对土壤-植物-人体产生毒害作用的重金属分级标准尚无规范可言。而其他重金属超过一定的限量也有可能对环境产生一些不利的影响。比如说 Co 会导致脱发,会严重损害人体血液内的细胞组织,造成白血球减少,引起血液系统疾病,如再生性障碍贫血

表 2 土壤重金属污染单因子指数评价结果(以背景值评价)
Table 2 Evaluation results of single-factor index for soil pollution
by heavy metals(Using natural background values
as evaluation standard)

样点	P_{Cu}	P_{Pb}	P_{Zn}	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Co}	P_{Ni}	P_{Mn}
1	23.46	2.99	1.72	12.21	0.99	1.98	1.34	1.06
2	9.45	3.58	2.31	13.14	1.06	1.69	1.97	0.93
3	5.39	8.79	2.80	28.85	1.16	2.15	1.55	1.95
4	10.99	3.16	2.41	17.53	0.58	3.00	1.23	1.68
5	4.38	22.27	3.66	34.05	1.24	2.10	1.83	2.22
6	5.95	2.94	2.47	26.25	1.20	1.49	1.89	1.89
7	2.51	3.95	2.74	28.27	1.27	2.32	1.83	2.08
8	4.69	5.24	2.69	29.46	1.40	2.09	2.08	1.57
9	5.58	2.56	2.29	23.91	1.22	2.61	2.10	1.87
10	1.61	3.12	1.60	19.62	1.13	2.51	1.39	1.83
11	2.40	4.87	3.02	30.39	1.05	2.23	2.08	2.25
12	2.58	1.28	1.28	29.52	0.83	1.85	1.41	1.54
13	6.23	2.00	1.23	17.09	0.83	1.67	1.22	0.85
14	4.59	1.73	1.23	29.73	0.89	1.59	1.25	1.39
15	2.35	1.66	1.27	18.41	1.53	1.94	1.35	1.56
16	2.04	1.44	1.04	18.50	0.82	2.03	1.24	1.55

表 3 土壤重金属污染单因子指数评价结果
(以国家二级标准评价)

Table 3 Evaluation results of single-factor index for soil pollution
by heavy metals(Using national standard as evaluation standard)

样点	P_{Cu}	P_{Pb}	P_{Zn}	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Ni}
1	14.40	0.32	0.72	7.00	0.57	1.25
2	2.90	0.32	0.77	3.77	0.46	1.47
3	1.66	0.78	0.94	8.27	0.50	1.16
4	3.37	0.28	0.81	5.02	0.25	0.92
5	1.35	1.98	1.22	9.76	0.53	1.37
6	3.65	0.31	1.03	15.05	0.69	1.77
7	0.77	0.35	0.92	8.10	0.55	1.36
8	1.44	0.47	0.90	8.45	0.60	1.55
9	1.71	0.23	0.77	6.85	0.52	1.56
10	0.99	0.33	0.67	11.25	0.65	1.30
11	1.47	0.52	1.26	17.42	0.60	1.94
12	1.58	0.14	0.54	16.93	0.48	1.32
13	3.83	0.21	0.51	9.80	0.47	1.14
14	2.82	0.19	0.51	17.05	0.51	1.17
15	1.44	0.18	0.53	10.56	0.88	1.26
16	1.25	0.15	0.44	10.61	0.47	1.16

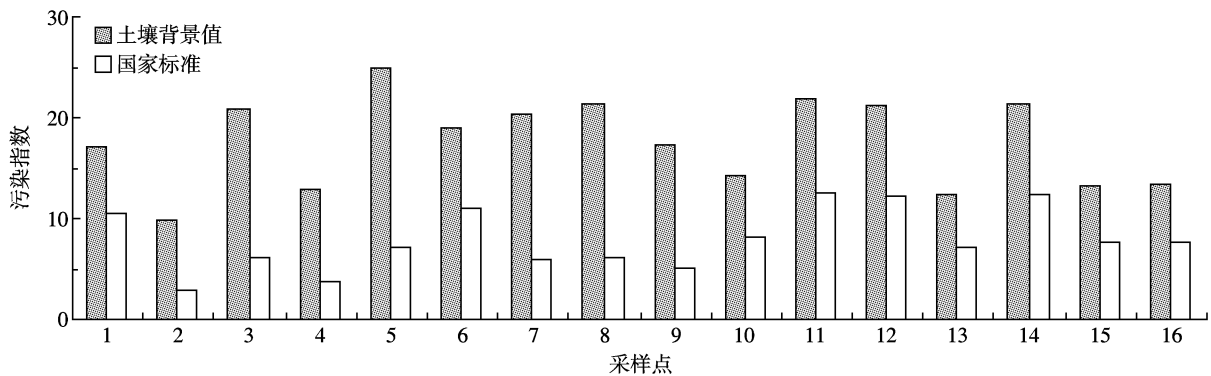


图 2 土壤重金属污染指数在各样点的分布(内梅罗综合污染指数法评价)

Figure 2 Index of soil pollution by heavy metals(Using Nemoro integrative index as evaluation method)

症,严重的会使人患上白血病(血癌),甚至死亡。因此,在条件允许的情况下进一步完善土壤环境质量标准体系也是目前值得关注的问题。

2.2 不同采样点油菜体内重金属含量变化

大冶矿区农田土壤采样点油菜各部位重金属监测统计结果见表 4。矿区农田所种植的油菜各部位重金属含量范围变化幅度较大,其中,除 Ni 含量在分布上符合根>茎叶>籽粒的基本规律(植物营养生理富集规律)之外,其他包括 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Co 在内的 5 种重金属含量分布规律都是茎叶>籽粒≈根,Mn 则是籽粒>茎叶>根。说明除了不同采样点土壤重金属含量差异之外,很可能是大气浮尘颗粒、采矿运输以及人为扰动造成了重金属在油菜不同部位异常的分布规律。对不同部位的变异系数进行权重分析,发现变异系数规律为 Ni>Cu≈Co>Cd>Mn>Pb>Zn,体现出 7 种重金属的变异差别顺序。本研究条件下,Ni 具有

最强的变异系数,受到外来污染的影响最大;Cu 和 Co 的变异系数近似相等,然后依次是 Cd、Mn、Pb、Zn。

对照食品卫生标准中现有的重金属项目发现,油菜地上部 Cu、Pb、Zn、Cd 的含量均超出最高限值,相比而言,油菜体内 Cd、Pb 超标倍数远大于 Cu、Zn。结合土壤重金属环境质量结果(Cd 严重超标,Cu 次之,而 Zn 和 Pb 未对土壤造成污染)可见,油菜体内重金属超标的成因极为复杂,很可能与来源不明确的各种污染源有关。这一结果与重金属在油菜体内不同部位异常的分布规律也是比较相符的。

此外,我国现有的食品卫生标准与土壤环境质量标准似乎也可能存在同样需要关注的问题,比如说对于一些可能会对人体造成潜在危害的重金属,在标准所涵盖的种类上是否有进一步扩展的可能性?这些是环保专家和政策制定者应重新审视的问题。另一方面,大部分有毒污染物的人类最大允许摄入量(参

表 4 不同采样点油菜各部位的重金属含量统计结果

Table 4 Statistics results of heavy metal contents in rapeseeds with different samples

项目	部位	Cu	Pb	Zn	Cd	Co	Ni	Mn
含量范围/ mg·kg ⁻¹	根	5.00~26.49	2.50~13.75	19.15~57.82	0~1.06	0.45~5.31	0.50~41.41	11.40~44.15
	茎叶	4.85~33.73	5.51~25.50	21.47~73.42	0.75~3.50	0.40~5.40	0.55~10.31	13.91~53.09
	籽粒	5.60~25.19	4.50~11.02	32.87~58.86	0.05~2.00	0.75~4.60	0.55~22.57	22.93~62.71
平均值/ mg·kg ⁻¹	根	14.60	5.74	31.52	0.66	2.31	12.73	28.77
	茎叶	15.40	12.74	49.74	1.63	2.95	5.26	29.48
	籽粒	12.89	7.17	42.92	0.80	2.34	5.14	35.50
标准偏差/ mg·kg ⁻¹	根	7.45	2.94	9.28	0.31	1.31	6.91	9.53
	茎叶	8.53	5.59	14.22	0.71	1.36	2.62	13.63
	籽粒	6.19	1.55	7.07	0.42	1.23	5.26	10.90
变异系数/%	根	51.01	51.12	29.44	46.70	56.83	54.28	33.14
	茎叶	55.38	43.87	28.58	43.23	46.18	49.77	46.21
	籽粒	48.06	21.54	16.46	53.03	52.50	102.49	30.71

注:食品卫生标准限值(mg·kg⁻¹):Pb≤0.2,Zn≤20,Cu≤10,Cd≤0.05。

考剂量, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) 参考标准体系在国外已基本建立, 而我国到目前为止尚无相关标准。同现有食品卫生标准相比, 后者能够更加真实、准确地评价某一污染物的危害程度。其中, US EPA 推荐的 Zn、Pb、Cd 的参考剂量值分别为 300×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 、 $1\times 10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[12-14]。国内也有利用健康风险指数对重金属可能对人体造成健康风险进行评价^[15-16], 这些研究也为我国下一步制定相应的质量评价体系提供了很好的参考依据。

2.3 油菜对不同重金属富集情况分析

为了说明土壤重金属的含量对油菜各部位重金属含量的直接作用, 以及油菜对重金属的吸收和累积特性的差异, 现采用富集系数的概念(油菜各部位重金属含量与土壤中重金属含量比值的分数)来衡量油菜中重金属质量分数与土壤中重金属质量分数的相关性。油菜重金属的富集系数见表 5。

对不同部位的富集系数进行权重分析, 发现富集系数规律为 $\text{Mn}>\text{Zn}>\text{Cd}>\text{Ni}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Co}$, 体现了油菜对 7 种重金属富集能力的差别。Mn、Zn 作为植物生长所必需的营养元素理应存在较高的富集系数。Cd 作为公认对生物有毒害作用的重金属, 权重富集系数排在第三位, 主要是因为油菜各部位富集系数都较高, 尤其是茎叶、籽粒的富集系数高于根部的富集系数, 说明造成油菜体内重金属 Cd 污染的来源除了土壤因素之外, 外界环境因素也对其污染产生了相对较大的影响。Ni 作为地壳自然存在的元素原本被认为不是植物的必需营养元素, 但是随着科技的发展, 它逐渐被认为是植物生长的第 17 种必需元素^[17]。本研究表明, Ni 的权重富集系数也相对较高, 根部远高于地上部, 说明 Ni 在油菜体内的富集与营养生理学规律相符。Cu 作为植物生长的必需元素理应有较高的吸收量, 但油菜体内含量表明 Cu 已经超标($\geq 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 而植物本身对逆境具备一定的调节能力, 故富集系数并

不高。Pb、Co 两种元素不是植物必需元素, 油菜富集能力自然较低。

3 结论

(1)单因子污染指数评价结果显示, 以土壤背景值进行评价, 土壤受到重金属不同程度的污染。其中, Cd 严重超标, Cu 次之。采用国家二级标准评价时, Zn、Cr 和 Pb 未对土壤造成污染。进行内梅罗综合污染指数法评价, 发现以土壤背景值为评价标准, 各采样点均达到重金属严重污染水平。以国家二级标准评价时, 只有 2 号采样点土壤属于中度污染水平, 其他采样点土壤都受到了较为严重的重金属污染。

(2)矿区农田所种植的油菜各部位重金属含量范围变化幅度较大。包括 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Co 在内的 5 种重金属含量分布规律都是茎叶>籽粒 $\approx$ 根, Mn 则是籽粒>茎叶>根。油菜地上部 Cu、Pb、Zn、Cd 含量均超出食品卫生标准中的最高限值, Cd、Pb 超标倍数远大于 Cu、Zn。富集系数变化规律为 $\text{Mn}>\text{Zn}>\text{Cd}>\text{Ni}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Co}$ 。

参考文献:

- [1] Bacon J R, Dinev N S. Isotopic characterization of lead in contaminated soils from the vicinity of a non-ferrous metal smelter near Plovdiv, Bulgaria[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134: 247-255.
- [2] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147: 168-175.
- [3] Silva I S, Abate G, Lichtig J, et al. Heavy metal distribution in recent sediments of the Tiete-Pinheiros river system in Sao Paulo state, Brazil [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17: 105-116.
- [4] Tang H X, Wang Z J, Liu J Y. Ecological impacts of heavy metal pollution from Dexing copper mine to Poyang lake[J]. *China Environmental Science*, 1994, 5(2): 97-101.
- [5] 赵学茂. 土壤重金属污染的防治方法[J]. 甘肃农业, 2006(2): 228.
ZHAO Xue-mao. Control methods to heavy metal pollution of Soils[J].

表 5 不同采样点油菜各部位的重金属元素富集系数

Table 5 Enrichment coefficients of heavy metals in rapes with different samples

项目	部位	Cu	Pb	Zn	Cd	Co	Ni	Mn
土壤测定值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		180.74	119.46	176.36	4.05	92.42	32.00	60.09
油菜测定值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根	14.60	5.74	31.52	0.66	2.31	12.73	28.77
	茎叶	15.40	12.74	49.74	1.63	2.95	5.26	29.48
	籽粒	12.89	7.17	42.92	0.80	2.34	5.14	35.50
富集系数	根	8.08	4.80	17.87	16.29	2.50	39.78	47.88
	茎叶	8.52	10.66	28.20	40.23	3.19	16.44	49.06
	籽粒	7.13	6.00	24.34	19.74	2.53	16.06	59.08

- Gansu Agriculture*, 2006(2):228.
- [6] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:188-213.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:188-213.
- [7] NY-T 1613—2008 土壤质量重金属测定 王水回流消解原子吸收法[S].
NY-T 1613—2008 Soil quality—analysis of soil heavy metals: Atomic absorption spectrometry with aqua regia digestion[S].
- [8] 谢正苗, 李 静, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4):742-747.
XIE Zheng-miao, LI Jing, XU Jian-ming, et al. Evaluation on environmental quality of Pb, Zn and Cu contents in vegetable plantation soils and vegetables in Hangzhou suburb[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4):742-747.
- [9] 黄国锋, 吴启堂. 绿色食品产地土壤环境质量现状评价标准的修正[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2):123-125.
HUANG Guo-feng, WU Qi-tang. Recommendation of amendment on standards of soil environmental quality for green-food production area[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(2):123-125.
- [10] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:334-378.
WEI Fu-sheng. Soil element background values in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:334-378.
- [11] 黄顺生, 华 明, 金 洋, 等. 南京郊区某菜地土壤镉污染水平及其来源调查[J]. 土壤通报, 2008, 39(2):129-132.
HUANG Shun-sheng, HUA Ming, JIN Yang, et al. Investigation of cadmium pollution and its major sources in vegetable land in the suburb of Nanjing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2):129-132.
- [12] U S EPA. Guidance for conducting remedial investigation and feasibility studies under CERCLA[EB/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [13] U S EPA. Guidelines for exposure assessment[EB/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [14] U S EPA. Office of solid waste and emergency response. soil screen guidance[R/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [15] 丁海霞, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌市郊农田土壤重金属的污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2183-2188.
DING Hai-xia, NAN Zhong-ren, LIU Xiao-wen, et al. Characteristics of selected heavy metal pollution in suburb cropland, Jinchang City, Gansu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2183-2188.
- [16] 汪 霞, 南忠仁, 武文飞, 等. 干旱区绿洲土壤-油菜系统重金属污染实验研究[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(9):824-825.
WANG Xia, NAN Zhong-ren, WU Wen-fei, et al. Study on heavy metals pollution between soil and rapes in the arid area[J]. *Journal of Environment and Health*, 2010, 27(9):824-825.
- [17] 廖 红, 严小龙. 高级植物营养学[M]. 北京:科学出版社, 2003:8-14.
LIAO Hong, YAN Xiao-long. Advanced plant nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2003:8-14.