

李洪奎, 李逸凡. 山东日照地区土壤重金属环境质量评价[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(4): 473-486.

LI Hong-kui, LI Yi-fan. Environmental Quality Evaluation of Soil Heavy Metals in Rizhao Area of Shandong, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(4): 473-486.

山东日照地区土壤重金属环境质量评价

李洪奎^{1,2}, 李逸凡³

(1. 山东省地质科学研究院 国土资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;

2. 山东省地质科学研究院 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;

3. 潍坊学院 建筑与工程学院, 山东 潍坊 261061)

摘要:通过系统生态地球化学调查与评价,在山东日照地区共采集了5 323个表层土壤样品,获取了表层土壤重金属元素地球化学分析数据。以表层土壤As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等8种重金属元素为研究对象,按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),采用单因子指数和综合评价指数对土壤环境质量进行评价。土壤单因子环境质量评价结果表明:As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等8种元素Ⅰ类土壤的面积比例分别为100.00%、98.21%、94.14%、98.10%、99.90%、89.18%、96.61%和98.37%,说明山东日照地区土壤环境质量良好;土壤单因子环境质量平均达到Ⅰ类土壤的占调查区土壤总面积的96.81%,Ⅱ类土壤占3.17%,Ⅲ类土壤仅占0.02%。表层土壤重金属元素污染综合评价结果表明:表层土壤环境质量属于Ⅰ类土壤(清洁—较清洁)的占调查区土壤总面积的86.39%,属于Ⅱ类土壤(轻度污染)的占13.55%,属于Ⅲ类土壤(中度污染)的占0.06%,说明山东日照地区表层土壤重金属综合污染很少,土壤环境质量总体状况良好。土壤重金属元素综合指标评价结果显示,未富集区面积累计占区域总面积的5.50%,弱富集区占38.63%,中度富集区占53.27%,重度富集区占2.60%,说明区域表层土壤中污染物已有积累趋势,虽未达到有害程度,亦应引起重视。

关键词:地球化学;土壤;重金属元素;环境质量;单因子指数;综合评价指数;山东

中图分类号:X142;X825

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)04-0473-14

Environmental Quality Evaluation of Soil Heavy Metals in Rizhao Area of Shandong, China

LI Hong-kui^{1,2}, LI Yi-fan³

(1. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization of Ministry of Land and Resources, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Weifang University, Weifang 261061, Shandong, China)

Abstract: Through systematic ecological geochemical survey and evaluation, 5 323 surface samples were collected in Rizhao area of Shandong, and the geochemical analysis data of heavy metal elements in the surface soil were obtained. The 8 kinds of heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in the surface soil were evaluated in accordance with the *soil environmental quality standard* (GB 15618—

收稿日期:2017-12-22; **修回日期:**2018-05-08 **投稿网址:**http://jese.chd.edu.cn/

基金项目:国家自然科学基金项目(41572068);国土资源公益性行业科研专项项目(201511029);

国家重点研发计划项目(2016YFC0600107);山东省日照市地质项目(WT-RZCG2015-1517);

山东省泰山学者建设工程专项经费项目(鲁政办字[2013]122号)

作者简介:李洪奎(1962-),男,山东昌乐人,研究员,工学博士,E-mail:lhklhk126@126.com。

1995), and the soil environmental quality was evaluated by using single factor index and comprehensive evaluation index. As showed by the results of soil environmental quality evaluation of single factor, the percentages of I class soil in 8 elements, such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn, are 100.00%, 98.21%, 94.14%, 98.10%, 99.90%, 89.18%, 96.61% and 98.37%, respectively, and the soil environmental quality is good in this area; the average single factor environmental quality of I class soil accounts for 96.81%, II class accounts for 3.17%, and III class only accounts for 0.02%. As showed by the results of comprehensive evaluation of soil heavy metal element pollution in the surface soil, the area of soil environmental quality which belongs to I class with clean-relative clean soil accounts for 86.39%, the area which belongs to II class with lightly polluted soil accounts for 13.55%, and the area which belongs to III class with moderate polluted soil accounts for only 0.06%, indicating that soil heavy metal pollution in Rizhao area is rare, and the soil environmental quality in overall is in good condition. As showed by the evaluation results of comprehensive index of heavy metal elements in soil, no enrichment area accounts for 5.50% of the total area, weak enrichment area accounts for 38.63%, moderate enrichment accounts for 53.27%, and severe enrichment area accounts for 2.60%, showing that the existing regional pollutants in surface soil has an accumulation trend; although the trend does not reach harmful degree, it should be paid more attention.

Key words: geochemistry; soil; heavy metal element; environment quality; single factor index; comprehensive evaluation index; Shandong

0 引言

土壤环境质量是指土壤环境(或土壤生态系统)的组成、结构和功能特性及其所处状态的水平^[1]。土壤环境质量评价是在研究土壤环境质量状态及其变化规律的基础上,对土壤环境质量的高低优劣进行定性与定量评价,依据其评价内容可分为土壤环境污染评价、土壤生态评价和综合评价^[2]。

土壤环境质量主要受自然环境和人为环境双重因素控制^[3]。自然环境指各种自然条件和自然资源的总和,如地质、地貌、气候、水文、生物等;人为环境指人类在自然环境的基础上,为了不断提高物质和精神生活水平,通过长期有计划、有目的的经济活动和社会活动逐步建立起来的生存环境^[4]。长期的人类活动在改造自然环境的同时,也对环境质量造成一定负面影响,如大量化肥、农药的使用和生产生活废弃物的排放等会导致土壤受到一定污染。目前,土壤污染已成为抑制农业可持续发展的一个重要因素,引起各级政府的高度重视,同时引起农业、环境、地质、社会等方面学者的广泛关注^[5-6]。

山东是较早开展生态地球化学调查的省份之一,从 2002 年开始,分三大片区完成了山东多目标生态地球化学调查与评价工作:第一片区是山东黄河下游流域生态地球化学调查与评价,工作面积 5.39×10^4 km²,于 2002 年 10 月开始,2006 年 10 月结束;第二片

区是山东东部地区农业生态地球化学调查与评价,于 2010 年 5 月完成该地区约 5.4×10^4 km² 的调查工作;第三片区是山东中部地区农业生态地球化学调查与评价,于 2014 年 10 月完成该地区约 4.9×10^4 km² 的调查工作。通过开展多目标生态地球化学调查与评价,查明区域土壤、浅层地下水的环境地球化学特征,查清土壤质量现状及矿产类、环境类等各类异常分布状况,为山东社会经济发展和规划、农业经济调整、环境保护、矿产资源勘查、地方病防治等领域提供基础资料和可靠翔实的科学依据。

本文在系统生态地球化学调查与评价基础上,在山东日照地区进一步采集了 5 323 个表层土壤样品,表层土壤基本分析样品 1 349 件,获取了表层土壤中多元素地球化学分析数据;重点对日照地区表层土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素依据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)进行初步评价,查明土壤环境质量状况和空间分布特征,为区域农业生产和发展规划、土壤施肥与改良、合理种植布局、农业生态环境保护、土地利用规划、污染治理与修复提供依据。

1 样品采集与分析方法

1.1 样品采集

山东日照地区表层土壤样品采用网格布样法采集,采样密度为每 1 km² 布置 1 个点,组合分析样品

为每 4 km² 布置 1 个点,采样深度为 0~20 cm。土壤采样点分布均匀,表层土壤在每个采样小格中都进行了布点,采样点位均布置在格子中部(个别点除外)。样品编号以 1:50 000 图幅为单元连续编号,表层土壤以 4 km² 为单位格子,按偶数方里网为界(2 km×2 km)将单位格子编号,编号顺序自上而下、自左向右。每个单位格子划分为 4 个小格(1 km²),标号顺序自左向右、自上而下为 A、B、C、D。格子编号前先做样品编号表,每 50 个号码为一批。其中随机取 1 个号码为重复样品大格编号,并在编号表上注明,另随机取 4 个号码为标准控制样品分析编号。样品编号时做到重复样和标准控制样在同一批次内基本均匀分布。取样采用 GPS 精确定位,同时结合地形图定点,采样点布置在农田、菜地、林(果)地、草地等。实地采集时主要选择单元样格内的主要土壤类型,尽最大可能保持每一组样格内的 4 个单点样品土壤类型一致,避开可能存在污染的土壤和人为搬运的堆积土。为增加土壤样品的代表性,采用一点多坑法采样,每个样点在直径 10 m 范围内选择 3~5 个 0~20 cm 耕层土壤混合,按四分法取分析样品,原始质量均大于 1 kg^[7]。在山前冲积地区采集时选择覆盖层较厚的地段采样,城镇区域样品采集时适当加深取样深度,以保证采样符合有关技术规范要求。

1.2 分析方法

表层土壤样品测试分析元素共计 54 种,其目的是为了建立以土壤为主体的系列地球化学参数和地球化学基准值、背景值,查明了山东日照地区土壤环境状况与污染特征,开展了生态地球化学现状预警研究。本文选取了 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素评价指标来对土壤环境质量进行

评价。

土壤样品测试分析由武汉综合岩矿测试中心完成。分析方法主要有等离子体发射光谱法、X 射线荧光光谱法、原子荧光光谱法、离子选择性电极法等^[8]。采用标准样、密码样、监控样等多种监控手段,保证了分析质量的可靠性。分析方法的准确度和精密度是用国家一级标准物质(GBW)的分析方法进行检验。配套方案是经过 12 次国家一级标准物质(GSS-1~GSS-8)系列样品分析,分别统计各被测项目平均值与标准值之间的对数差($\Delta \lg C$)和相对标准偏差(RSD)精密度。实验室分析方法的精密度和准确度均符合规范要求。

2 地球化学特征

土壤重金属地球化学特征的两个主要参数是基准值和背景值,它们分别代表了不同环境土壤中元素含量水平和变化规律。基准值是用来衡量人类活动对自然影响程度的度量标准,即自然状态下形成的土壤化学成分,它反映的是自然状态的本质特点,随时空转化呈现动态变化,主控因素主要是地质背景、沉积物来源和类型以及自然环境特征。背景值是用来界定异常大小的一般含量及一般变化幅度,代表相对不受污染或少受污染的土壤平均化学组成,它反映的是自然元素以不同相态在地表环境中循环演化的某一时空状态的一般性,受自然和人为扰动的双重影响。

2.1 基准值特征

山东日照地区土壤重金属元素基准值见表 1。从表 1 可以看出:与全国 C 层土壤平均值对比,As、Cu、Hg 基准值明显偏低,分别为全国 C 层土壤平均

表 1 土壤重金属元素地球化学特征

Tab. 1 Geochemical Characteristics of Soil Heavy Metal Elements

元素	原始数据			基准统计特征值				背景值/ 10 ⁻⁶	C 层土壤平均值/ 10 ⁻⁶		A 层土壤平均值/ 10 ⁻⁶	
	平均值/ 10 ⁻⁶	离差	变异系数	样本数	基准值/ 10 ⁻⁶	离差	变异系数		山东	全国	山东	全国
As	6.000	2.37	0.40	282	5.300	1.41	0.27	5.000	9.300	11.500	9.300	11.200
Cd	0.096	0.10	0.99	276	0.076	0.02	0.26	0.105	0.083	0.084	0.084	0.097
Cr	61.500	34.28	0.56	269	51.700	13.25	0.26	48.600	70.000	60.800	66.000	61.000
Cu	19.400	9.77	0.50	303	17.400	4.55	0.26	17.700	24.500	23.100	22.400	22.600
Hg	0.020	0.05	2.39	274	0.015	0.00	0.00	0.023	0.015	0.044	0.019	0.065
Ni	27.900	16.40	0.59	298	24.300	7.11	0.29	20.100	29.400	28.600	25.800	26.900
Pb	27.200	11.40	0.42	256	23.700	2.76	0.12	25.500	25.300	24.700	25.800	26.000
Zn	64.700	20.02	0.31	279	59.700	9.92	0.17	62.700	71.400	71.700	50.000	74.200

值的 45.89%、75.18% 和 33.64%, Cr、Ni 和 Zn 基准值略偏低, Cd、Pb 基准值则基本接近全国 C 层土壤平均值; 与山东 C 层土壤平均值对比, As、Cr、Cu、Ni、Zn 等基准值低于山东 C 层土壤平均值, 其中 As、Cr、Cu 基准值明显偏低, Ni、Zn 基准值略偏低, 而 Cd、Hg、Pb 等基准值与山东 C 层土壤平均值基本接近。

2.1.1 成土母质单元

山东日照地区的成土母质单元主要有中生代大盛群、莱阳群、青山群和王氏群, 新元古代青白口纪荣成序列、南华纪月季山序列, 白垩纪崂山序列、伟德山序列, 第四纪山前组、临沂组等。成土母质单元土壤重金属元素基准值见表 2。

表 2 成土母质单元土壤重金属元素基准值统计结果

Tab. 2 Statistical Results of Base Values for Soil Heavy Metal Elements of Parent Material Units

地质单元	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
中生代 大盛群(18)	样本数	15	17	18	16	16	17	15	13
	基准值/ 10^{-6}	8.000	0.098	77.900	22.100	0.014	33.400	23.500	63.800
	变异系数/%	0.14	0.29	0.24	0.19	0.16	0.25	0.07	0.10
中生代 莱阳群(38)	样本数	31	31	30	29	24	29	32	35
	基准值/ 10^{-6}	5.500	0.092	54.500	17.200	0.015	23.100	24.300	63.800
	变异系数/%	0.25	0.17	0.11	0.17	0.15	0.14	0.15	0.16
中生代 青山群(18)	样本数	16	13	17	14	15	16	14	17
	基准值/ 10^{-6}	6.700	0.095	58.300	19.800	0.020	24.600	28.600	70.000
	变异系数/%	0.22	0.18	0.27	0.14	0.27	0.27	0.14	0.17
中生代 王氏群(12)	样本数	11	11	8	11	11	11	11	12
	基准值/ 10^{-6}	8.300	0.077	78.900	22.500	0.015	35.100	21.400	59.600
	变异系数/%	0.20	0.23	0.07	0.17	0.22	0.15	0.09	0.18
新元古代青白口 纪荣成序列(22)	样本数	17	19	17	20	14	17	18	21
	基准值/ 10^{-6}	3.600	0.093	50.400	15.000	0.014	20.600	24.900	73.100
	变异系数/%	0.27	0.36	0.23	0.28	0.23	0.21	0.16	0.32
新元古代南华纪 月季山序列(35)	样本数	30	34	30	27	31	31	33	29
	基准值/ 10^{-6}	4.900	0.085	51.300	14.300	0.015	23.900	24.700	60.400
	变异系数/%	0.22	0.33	0.27	0.18	0.22	0.30	0.18	0.17
白垩纪崂山 序列(25)	样本数	24	20	23	21	18	22	21	19
	基准值/ 10^{-6}	4.300	0.057	33.100	12.500	0.014	14.600	24.700	48.100
	变异系数/%	0.26	0.37	0.27	0.25	0.17	0.25	0.17	0.14
白垩纪伟德山 序列(23)	样本数	22	22	22	20	20	23	18	22
	基准值/ 10^{-6}	4.800	0.101	45.100	19.800	0.016	23.000	27.600	73.700
	变异系数/%	0.35	0.36	0.32	0.19	0.23	0.37	0.11	0.21
第四纪 山前组(22)	样本数	20	19	19	19	21	20	22	20
	基准值/ 10^{-6}	6.200	0.078	62.800	19.300	0.016	29.400	25.200	62.400
	变异系数/%	0.32	0.24	0.27	0.20	0.28	0.27	0.15	0.14
第四纪 临沂组(188)	样本数	35	40	35	37	37	39	39	41
	基准值/ 10^{-6}	5.200	0.073	53.200	18.500	0.016	25.200	24.300	55.500
	变异系数/%	0.20	0.24	0.19	0.16	0.26	0.23	0.10	0.17

注:地质单元括号内的数字表示原样本数。

山前组和临沂组为第四纪成土母质,其成土物质来源广泛,主要形成于河谷、山前阶地或洪积扇等。与调查区土壤基准值相比,山前组土壤中 Cd、Hg、Pb 和 Zn 等基准值与调查区土壤基准值基本接

近,As 基准值略偏高,Pb、Ni、Cr 基准值基本接近于调查区土壤基准值。

中生代大盛群、中生代莱阳群、中生代青山群、中生代王氏群、新元古代青白口纪荣成序列、新元古

代南华纪月季山序列、白垩纪崂山序列、白垩纪伟德山序列为残坡积母质,主要为岩石风化沉积物原地或近距离搬运堆积形成的产物,这些地质单元沉积物来源主要为下伏岩体或就近出露岩石,物质来源相对简单,能较好地保存区域岩石的化学信息,与基岩层具有良好的承袭关系。与调查区土壤基准值相比,中生代大盛群土壤中 Cd、Cu 基准值略偏高,As、Cr、Ni 等基准值明显偏高,其余元素基准值与调查区土壤基准值相当。中生代莱阳群土壤中 Cd 基准值略偏高,其余元素基准值与调查区土壤基准值基本相当。中生代青山群土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 等基准值略偏高,Hg 基准值明显偏高,Ni 基准值与调查区土壤基准值相当,说明该地质单元自身发育形成的土壤环境质量较差。中生代王氏群土壤中 Cu 基准值略偏高,As、Cr、Ni 等基准值明显偏高,其余元素基准值与调查区土壤基准值基本接近。白垩纪崂山序列土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 等基准值与调查区土壤基准值相比明显偏低,最低为 Ni,为调查区土壤基准值的 60.23%,As、Zn 等基准值略偏低,其余元素基准值则基本接近调查区土壤基准值。白垩纪伟德山序列土壤中 As、Cr 基准值略低,而

Cu、Pb、Zn 等基准值略偏高,Cd 基准值明显偏高,其余元素基准值则与调查区土壤基准值基本接近。新元古代青白口纪荣成序列土壤中 As 基准值与调查区土壤基准值相比明显偏低,Cu 基准值略偏低,Cd、Zn 基准值略偏高,其他元素基准值与调查区土壤基准值基本接近。新元古代南华纪月季山序列土壤中 Cu 基准值略偏低,其余元素基准值与调查区土壤基准值基本相当。

根据成土母质单元土壤重金属元素基准值综合对比可知,不同地质单元出现极高值元素主要与火山岩有关,Cu、Hg、Zn、Pb、Ni 等元素的主要地质因素为中生代火山岩,而其他地质单元对土壤环境质量的影响微弱。

2.1.2 主要地貌单元

山东日照地区可分为剥蚀-海蚀平原、剥蚀平原、冲积-海积平原、冲积-洪积平原、海积平原、微切割-强剥蚀丘陵、微弱切割丘陵、中度切割低山和中度剥蚀低山 9 种地貌类型。表 3 列出了 7 种主要地貌类型土壤重金属元素基准值。

与调查区土壤基准值相比,剥蚀-海蚀平原深层土壤中 Cd、Cu、Zn 基准值略偏低,As、Hg、Pb 基准

表 3 地貌单元土壤重金属元素基准值统计结果

Tab. 3 Statistical Results of Base Values for Soil Heavy Metal Elements of Landform Units

地貌单元	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
剥蚀-海蚀平原(14)	样本数	13	11	12	13	12	12	11	12
	基准值/ 10^{-6}	6.800	0.062	49.000	14.500	0.017	24.100	26.700	52.100
	变异系数/%	0.42	0.28	0.29	0.28	0.24	0.30	0.11	0.24
剥蚀平原(27)	样本数	25	24	22	25	24	24	17	27
	基准值/ 10^{-6}	5.000	0.070	51.500	16.500	0.015	24.900	23.400	55.900
	变异系数/%	0.33	0.20	0.26	0.31	0.23	0.33	0.05	0.16
冲积-海积平原(19)	样本数	13	15	18	17	19	19	17	18
	基准值/ 10^{-6}	3.700	0.062	41.600	11.600	0.019	21.600	26.200	49.900
	变异系数/%	0.27	0.27	0.42	0.28	0.47	0.46	0.11	0.24
冲积-洪积平原(57)	样本数	50	46	46	47	48	45	42	52
	基准值/ 10^{-6}	7.300	0.080	72.800	21.100	0.015	31.500	22.600	59.900
	变异系数/%	0.21	0.23	0.16	0.13	0.24	0.13	0.08	0.15
微切割-强剥蚀丘陵(157)	样本数	110	130	120	119	116	104	118	129
	基准值/ 10^{-6}	4.700	0.079	48.100	16.200	0.014	21.500	23.700	61.000
	变异系数/%	0.18	0.28	0.23	0.19	0.20	0.18	0.13	0.18
微弱切割丘陵(15)	样本数	15	15	14	14	14	15	13	14
	基准值/ 10^{-6}	5.600	0.066	50.000	17.000	0.015	24.200	22.800	62.000
	变异系数/%	0.36	0.24	0.27	0.32	0.23	0.26	0.11	0.19
海积平原(11)	样本数	11	11	10	11	11	10	11	9
	基准值/ 10^{-6}	5.300	0.077	36.400	10.400	0.019	17.700	24.200	38.900
	变异系数/%	0.25	0.55	0.26	0.20	0.47	0.28	0.19	0.16

注:地貌单元括号内的数字表示原样本数。

值略偏高;剥蚀平原土壤中重金属元素基准值与之基本相似;冲积-海积平原土壤中 As、Cu 基准值偏低,其中 Cu 最低,为调查区土壤基准值的 66.43%,Cd、Cr 等基准值略偏低,Hg、Pb 基准值略偏高;冲积-洪积平原土壤中 Cu、Ni 基准值略偏高,As、Cr 基准值明显偏高;微切割-强剥蚀丘陵土壤中 As、Ni 基准值略偏低,其余元素基准值基本接近调查区土壤基准值;微弱切割丘陵土壤中 Cd 基准值略偏低;中度切割低山土壤中仅 Ni 基准值略偏低,Cu、Hg、Pb、Zn 基准值略偏高,Cd 基准值明显偏高。

从地貌单元土壤重金属元素的变异系数(表 3)

来看,冲积-洪积平原、微切割-强剥蚀丘陵和中度切割低山土壤中绝大部分重金属元素的变异系数相对较小(小于 0.3),分布均一。而剥蚀-海蚀平原、剥蚀平原、冲积-海积平原和微弱切割丘陵土壤中 As、Cu 的变异系数较大,反映了在地貌作用和内生地球化学作用下这些元素的地球化学活性增强,迁移重分配而产生较大含量变化。

2.2 背景值特征

2.2.1 成土母质单元

山东日照地区成土母质单元土壤重金属元素背景值见表 4。

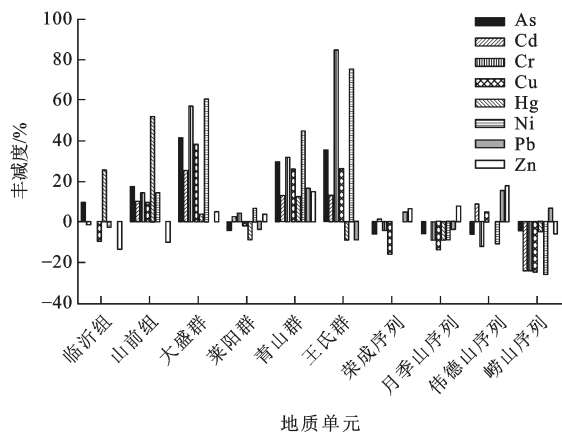
表 4 成土母质单元土壤重金属元素背景值统计结果

Tab. 4 Statistical Results of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of Parent Material Units

地质单元	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
中生代 大盛群(77)	样本数	64	63	69	71	72	66	65	71
	背景值/ 10^{-6}	7.100	0.132	76.700	24.600	0.024	32.400	25.300	65.900
	变异系数/%	0.21	0.20	0.18	0.18	0.21	0.16	0.07	0.16
中生代 莱阳群(151)	样本数	95	120	120	125	125	132	145	128
	背景值/ 10^{-6}	4.800	0.108	50.900	17.400	0.021	21.500	24.600	65.200
	变异系数/%	0.16	0.17	0.13	0.19	0.13	0.20	0.12	0.15
中生代 青山群(91)	样本数	81	66	79	74	81	71	91	71
	背景值/ 10^{-6}	6.500	0.119	64.300	22.400	0.026	29.200	29.800	72.500
	变异系数/%	0.22	0.18	0.30	0.22	0.17	0.16	0.14	0.12
中生代 王氏群(47)	样本数	42	41	41	39	36	43	39	45
	背景值/ 10^{-6}	6.800	0.119	90.100	22.400	0.021	35.300	23.300	62.500
	变异系数/%	0.17	0.16	0.18	0.17	0.17	0.19	0.07	0.19
新元古代青白口 纪荣成序列(84)	样本数	78	71	64	61	55	65	67	57
	背景值/ 10^{-6}	4.700	0.107	46.600	14.900	0.023	20.100	26.800	67.100
	变异系数/%	0.21	0.24	0.17	0.18	0.13	0.18	0.09	0.11
新元古代南华纪 月季山序列(146)	样本数	133	132	112	125	117	95	89	126
	背景值/ 10^{-6}	4.700	0.106	44.500	15.300	0.021	18.300	24.600	67.800
	变异系数/%	0.21	0.25	0.25	0.23	0.23	0.18	0.08	0.19
白垩纪伟德山 序列(99)	样本数	81	84	76	75	73	67	78	94
	背景值/ 10^{-6}	4.700	0.115	42.600	18.700	0.023	18.000	29.600	74.300
	变异系数/%	0.15	0.27	0.19	0.17	0.21	0.15	0.14	0.24
白垩纪崂山 序列(81)	样本数	75	51	74	60	62	67	55	70
	背景值/ 10^{-6}	4.800	0.080	36.900	13.400	0.022	14.900	27.300	59.000
	变异系数/%	0.23	0.17	0.34	0.19	0.21	0.28	0.07	0.20
第四纪 山前组(51)	样本数	45	46	45	44	44	39	37	45
	背景值/ 10^{-6}	5.900	0.116	55.700	19.500	0.035	23.100	25.400	56.400
	变异系数/%	0.18	0.25	0.22	0.24	0.31	0.18	0.08	0.17
第四纪 临沂组(188)	样本数	173	140	154	120	130	142	138	144
	背景值/ 10^{-6}	5.500	0.104	48.700	16.100	0.029	19.700	25.400	54.400
	变异系数/%	0.22	0.16	0.21	0.16	0.28	0.19	0.08	0.14

注:地质单元括号内的数字表示原样本数。

与调查区土壤背景值相比,第四纪山前组单元表层土壤中仅 Zn 背景值偏低,As、Cd、Cr、Cu、Ni 等背景值略偏高,Hg 背景值明显偏高,最高的 Hg 背景值为调查区土壤背景值的 1.5 倍,Pb 背景值与调查区土壤背景值基本接近;临沂组单元表层土壤中 Zn 背景值略偏低,Hg 背景值略偏高,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本接近(图 1)。



丰减度为重金属元素背景值相对山东日照地区对应
重金属元素背景值的相对大小

图 1 成土母质单元土壤重金属元素背景值丰减图

Fig. 1 Differences of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of Parent Material Units

将残坡积母质与调查区土壤背景值进行对比,结果表明:以中生代大盛群为地质单元划分的表层土壤中 Cd 背景值略偏高,As、Cr、Cu、Ni 等背景值明显偏高;以中生代莱阳群为地质单元划分的表层土壤中 Hg 背景值略偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值较为接近;以中生代青山群为地质单元划分的表层土壤中 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 等背景值略偏高,Cr、Ni 背景值明显偏高,其中最高的 Ni 背景值为调查区土壤背景值的 1.45 倍;以中生代王氏群为地质单元划分的表层土壤中 Cd、Cu 背景值略偏高,As、Cr、Ni 等背景值明显偏高,其中最高的为 Cr,是调查区土壤背景值的 1.85 倍,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本一致;以白垩纪崂山序列为地质单元划分的表层土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 背景值明显偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本接近;以白垩纪伟德山序列为地质单元划分的表层土壤中 Cr、Ni 背景值略偏低,Zn 背景值略偏高,其余元素背景值与调查区土壤背景值较为接近;以新元古代荣成序列为地质单元划分的表层土壤中 Cu 背景值略偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值较为接近。以新元古

代月季山序列为地质单元划分的表层土壤中 Cu 背景值略偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值较为接近。

从成土母质单元土壤重金属元素变异系数(表 4)来看,不同地质单元内地球化学组分分布均一性较好。其中,临沂组、伟德山序列、月季山序列、荣成序列和大盛群重金属元素的变异系数均较小,不超过 0.3,分布均一;莱阳群、青山群、王氏群和崂山序列绝大部分重金属元素的变异系数较小,但 Ni、Hg、Cr 等的变异系数超过 0.3,具有局部富集的趋势。

2.2.2 主要土壤类型单元

不同土壤类型由于成土母质、土壤物理化学性质对元素产生迁移转化的影响,元素的含量和变异系数具有较大差异。区内 7 个主要土壤类型单元重金属元素背景值统计结果见表 5,其主要土壤类型单元重金属元素背景值丰减情况见图 2。

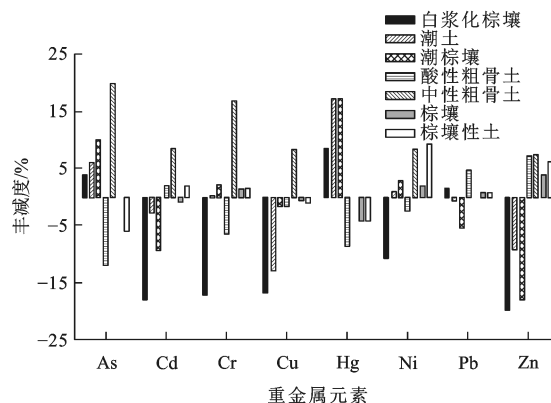


图 2 主要土壤类型单元重金属元素背景值丰减图

Fig. 2 Differences of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of Main Soil Type Units

与调查区土壤背景值相比,白浆化棕壤中 Zn 背景值明显偏低,Cd、Cr、Cu、Ni 等背景值略偏低,其余元素背景值均接近调查区土壤背景值;潮土中 Cu 背景值略偏低,Hg 背景值略偏高,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本接近;潮棕壤中 Zn 背景值略偏低,Hg 背景值略偏高,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本一致;酸性粗骨土重金属元素的背景值与调查区土壤背景值基本一致;中性粗骨土中 As、Cr 背景值略偏高,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本一致;棕壤性土重金属元素背景值与调查区土壤背景值基本相似。

从主要土壤类型单元重金属元素变异系数(表 5)来看,主要土壤类型单元重金属元素的变异系数均较小,这说明主要土壤类型单元重金属元素空间分布均一。

表 5 主要土壤类型单元重金属元素背景值统计结果

Tab. 5 Statistical Results of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of Main Soil Type Units

土壤类型	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
白浆化棕壤(72)	样本数	61	59	52	55	54	52	59	64
	背景值/ 10^{-6}	5.200	0.086	40.200	14.700	0.025	17.900	25.900	50.100
	变异系数/%	0.18	0.19	0.12	0.19	0.24	0.13	0.11	0.19
潮土(160)	样本数	147	143	115	95	118	133	137	140
	背景值/ 10^{-6}	5.300	0.102	48.700	15.400	0.027	20.300	25.300	56.800
	变异系数/%	0.22	0.22	0.18	0.14	0.30	0.24	0.11	0.18
潮棕壤(71)	样本数	62	44	58	55	42	56	54	52
	背景值/ 10^{-6}	5.500	0.095	49.700	17.400	0.027	20.700	24.100	51.300
	变异系数/%	0.17	0.12	0.19	0.17	0.22	0.17	0.12	0.14
酸性粗骨土 (253)	样本数	212	215	194	220	191	182	180	209
	背景值/ 10^{-6}	4.400	0.107	45.400	17.400	0.021	19.600	26.700	67.200
	变异系数/%	0.22	0.26	0.26	0.28	0.22	0.22	0.11	0.18
中性粗骨土 (147)	样本数	125	112	121	117	118	103	114	116
	背景值/ 10^{-6}	6.000	0.114	56.900	19.200	0.023	21.800	25.500	67.400
	变异系数/%	0.28	0.19	0.21	0.21	0.23	0.19	0.15	0.14
棕壤(228)	样本数	193	179	161	173	172	160	179	191
	背景值/ 10^{-6}	5.000	0.104	49.300	17.600	0.022	20.500	25.700	65.200
	变异系数/%	0.18	0.21	0.21	0.19	0.24	0.22	0.13	0.19
棕壤性土(136)	样本数	114	124	97	115	107	115	102	109
	背景值/ 10^{-6}	4.700	0.107	49.400	17.500	0.022	22.000	25.700	66.600
	变异系数/%	0.20	0.23	0.21	0.23	0.19	0.29	0.12	0.17

注:土壤类型括号内的数字表示原样本数。

2.2.3 县级行政区单元与调查区土壤背景值相比(图 3),东港区土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 背景值略偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本接近;岚山区土壤中 Cd、Cu

山东日照地区县级行政区的土壤重金属元素背景值统计结果见表 6。

表 6 县级行政区单元土壤重金属元素背景值统计结果

Tab. 6 Statistical Results of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of County Administrative Region Units

行政区名称	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
东港区(298)	样本数	252	220	214	229	221	205	212	269
	背景值/ 10^{-6}	4.800	0.086	41.000	14.800	0.022	17.500	25.000	58.600
	变异系数/%	0.19	0.22	0.22	0.22	0.29	0.21	0.09	0.25
莒县(480)	样本数	420	394	358	404	325	402	380	411
	背景值/ 10^{-6}	5.800	0.114	64.000	21.100	0.024	27.200	24.800	61.500
	变异系数/%	0.25	0.21	0.2	0.21	0.25	0.25	0.13	0.18
岚山区(198)	样本数	165	155	125	152	161	119	145	165
	背景值/ 10^{-6}	4.700	0.094	44.100	14.900	0.023	18.400	25.600	60.000
	变异系数/%	0.18	0.18	0.16	0.19	0.28	0.14	0.09	0.20
五莲县(373)	样本数	313	302	247	297	303	240	285	298
	背景值/ 10^{-6}	5.200	0.114	48.800	18.000	0.023	19.300	26.700	66.200
	变异系数/%	0.24	0.21	0.15	0.22	0.21	0.14	0.13	0.15

注:行政区名称括号内的数字表示原样本数。

背景值略偏低,其余元素背景值与调查区土壤背景值基本一致;莒县 As、Cu 背景值略偏高,Cr、Ni 背景值明显偏高,分别为调查区土壤背景值的 1.32 倍和 1.35 倍;五莲县元素的背景值与调查区土壤背景值基本一致。

与山东 A 层土壤平均值相比,县级行政区土壤背景值变化规律基本一致,As、Cr、Cu 背景值均偏低,而 Cd、Hg、Zn 偏高。对 8 种土壤重金属元素而言,As、Cr、Cu、Ni 和 Pb 在 4 个县级行政区的背景值均低于全国 A 层土壤平均值,仅莒县的 Cd、五莲县的 Cd 和 Zn 背景值明显偏高,而东港区、岚山区的 Cd 和 Zn 以及 4 个县级行政区的 Hg 背景值接近或略高于全国 A 层土壤平均值。

3 环境质量评价方法

3.1 评价标准与方法

土壤重金属环境质量评价以表层土壤地球化学数据为基础,参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),根据土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素的实测资料,确定单因子环境质量分级^[9-11]。然后在单因子指数的基础上,利用综合评价指数计算综合评价结果,确定各评价单元土壤重金属环境质量级别及其应用功能^[12-14]。

以网格作为基本评价单元,将区域地球化学调查获得土壤中每 4 km² 1 组的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量数据以及土壤中每 64 km² 1 组的阳离子交换量(CEC)条件下对应元素的土壤环境质量分级标准相比较,根据下列计算公式判定各元素在每个测点上的环境质量指数^[15]。

$$Z_i = \begin{cases} X_i/C_1 & X_i \leq C_1 \\ 1+(X_i-C_1)/(C_{II_a}-C_1) & C_1 < X_i \leq C_{II_a}, pH \leq 6.5 \\ 1+(X_i-C_1)/(C_{II_b}-C_1) & C_1 < X_i \leq C_{II_b}, 6.5 < pH \leq 7.5 \\ 1+(X_i-C_1)/(C_{II_c}-C_1) & C_1 < X_i \leq C_{II_c}, pH > 7.5 \\ 2+(X_i-C_{II_a})/(C_{III}-C_{II_a}) & C_{II_a} < X_i \leq C_{III}, pH \leq 6.5 \\ 2+(X_i-C_{II_b})/(C_{III}-C_{II_b}) & C_{II_b} < X_i \leq C_{III}, 6.5 < pH \leq 7.5 \\ 2+(X_i-C_{II_c})/(C_{III}-C_{II_c}) & C_{II_c} < X_i \leq C_{III}, pH > 7.5 \\ 3+(X_i-C_{III})/C_{III} & X_i > C_{III} \end{cases}$$

式中: Z_i 为第 i 种元素环境质量指数; X_i 为实测数据; C_1 为土壤一级临界值上限; C_{II_a} 为土壤 $pH \leq 6.5$ 时二级临界值上限; C_{II_b} 为土壤 $6.5 < pH \leq 7.5$ 时二级临界值上限; C_{II_c} 为土壤 $pH > 7.5$ 时二级临界值上限; C_{III} 为三级临界值上限。

将环境质量指数(Z_i)划分成 4 个级次(表 7),分

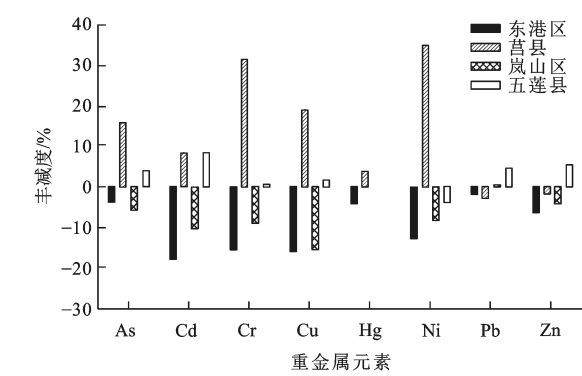


图 3 县级行政区土壤重金属元素背景值丰减图
Fig. 3 Differences of Background Values for Soil Heavy Metal Elements of County Administrative Region Units

别代表 I 类土壤、II 类土壤、III 类土壤、劣 III 类土壤;再以色块图或等值线图等形式制作单因子环境质量分级图和综合指标环境质量分级图,统计各元素分属各级环境质量的面积及占调查区总面积比例。这种统计结果不仅反映各种污染物的平均污染水平,也反映污染最严重的污染物给环境造成的危害^[16-17]。

表 7 环境质量评价分级标准
Tab. 7 Evaluation Classification Standards of Environmental Quality

环境质量	定量标准	污染等级	污染水平
I 类土壤	$Z_i \leq 1$	安全—警戒线	非污染,清洁—较清洁
II 类土壤	$1 < Z_i \leq 2$	轻污染	土壤轻污染,作物已受污染
III 类土壤	$2 < Z_i \leq 3$	中度污染	土壤、作物均受中度污染
劣 III 类土壤	$Z_i > 3$	重度污染	土壤、作物均受重度污染

3.2 数据处理

所有数据的统计分析采用 SPSS19.0 和 Excel2010 软件进行,土壤重金属元素环境质量分级图通过 ArcGIS9.2 软件完成。

4 评价结果

4.1 土壤环境质量综合评价

4.1.1 单因子环境质量评价

土壤重金属单因子环境质量评价结果见表 8。从表 8 可以看出,区域内 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素 I 类土壤的面积比例分别为 100.00%、98.21%、94.14%、98.10%、99.90%、89.18%、96.61%和 98.37%,说明区域内土壤环境质量良好。单因子环境质量平均达到 I 类土壤的占 96.81%,As 符合 I 类土壤标准范畴;符合 II 类土壤标准范畴的有 Cu、Pb、Zn,II 类土壤平均占 3.17%;Cr、Cd、Hg、Ni 出现 III 类或劣 III 类土壤,面积最大者为 Cd,面积比例分别为 0.030%、0.440%,III 类土壤

表 8 单因子环境质量评价结果

Tab. 8 Evaluation Results of Single Factor Environmental Quality

元素	Ⅰ类土壤		Ⅱ类土壤		Ⅲ类土壤		劣Ⅲ类土壤	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
As	5 307.11	100.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
Cd	5 212.25	98.21	92.45	1.74	1.74	0.030	23.110	0.440
Cr	4 996.30	94.14	309.75	5.84	0.86	0.016	0.198	0.004
Cu	5 206.29	98.10	100.82	1.90	0.00	0.000	0.000	0.000
Hg	5 301.95	99.90	3.90	0.07	1.25	0.020	0.000	0.000
Ni	4 732.77	89.18	573.17	10.80	1.17	0.020	0.000	0.000
Pb	5 127.24	96.61	179.87	3.39	0.00	0.000	0.000	0.000
Zn	5 220.39	98.37	86.71	1.63	0.00	0.000	0.000	0.000

注:调查总面积为 5 307.11 km²,比例表示各元素分属各级环境质量的面积占调查区土壤总面积的百分比。

仅占土壤总面积的 0.020%,说明Ⅲ类土壤所占比例极少。综上所述,区域内绝大多数土壤单因子环境质量达到Ⅰ类、Ⅱ类土壤,土壤环境质量总体状况良好。

4.1.2 土壤环境功能类型分布

区域表层土壤中 As 含量在大部分地区普遍较低,调查区均属Ⅰ类土壤,是唯一没有出现Ⅱ类土壤的重金属元素。

Cd 的土壤环境功能类型以Ⅰ类土壤为主,Ⅰ类土壤面积为 5 212.25 km²,占 98.21%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 92.45 km²,占 1.74%,零散分布在东莞镇、墙夯水库南、长岭镇、中楼镇以及南湖镇北,这些地区多分布有铁矿点、金矿点或矿化点,推测Ⅱ类土壤主要与矿产伴生或开采污染有关;Ⅲ类和劣Ⅲ类土壤面积为 24.85 km²,其中Ⅲ类土壤面积为 1.74 km²,占 0.03%,劣Ⅲ类土壤面积为 23.11 km²,占 0.44%,呈点源状分布在日照城区,从分布位置及态势来看,初步分析Ⅲ类和劣Ⅲ类土壤的形成与人类生活点源污染有关。

Cr 的土壤环境功能类型以Ⅰ类土壤为主,面积为 4 996.30 km²,占 94.14%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 309.75 km²,占 5.84%,主要分布在西部剥蚀平原区,如颤山镇—东莞镇、夏庄镇北、果庄乡西,另外在日照水库南部也有零星分布;Ⅲ类土壤面积为 0.86 km²,占 0.016%,劣Ⅲ类土壤面积为 0.198 km²,占 0.004%,呈点源状分布在岚山区碑廓镇北部铁矿点周边地带,推测与铁矿开采污染有关。

土壤中 Cu 含量较低,Cu 的土壤环境功能类型以Ⅰ类土壤为主,面积为 5 206.29 km²,占 98.10%;Ⅱ类土壤次之,面积为 100.82 km²,占 1.90%,主要分布在墙夯水库南部七宝山、柏松乡北、店子集镇周边

地区以及陈疃镇北部;Ⅱ类土壤与 Cd 的Ⅱ类、Ⅲ类土壤分布在空间上吻合较好,推测与墙夯水库南部七宝山金矿伴生铜或闪长岩体有关。

Hg 的土壤环境功能类型以Ⅰ类土壤为主,面积为 5 301.95 km²,占 99.90%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 3.90 km²,占 0.07%,呈点源状分布在南湖镇东部、后村镇周边以及涛雒镇;Ⅲ类土壤面积为 1.25 km²,占 0.02%,仅分布在后村镇周边,Ⅲ类土壤的分布面积虽然不大,但很有可能指示出该地区的污染中心,初步分析Ⅲ类土壤的出现主要是人类生活活动(如生活垃圾或小型污染企业点源污染)引起的。

Ni 的Ⅰ类土壤面积为 4 732.77 km²,占 89.18%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 573.17 km²,占 10.80%,是 8 种重金属元素中Ⅱ类土壤分布面积最大的元素,主要分布在西部平原颤山镇—东莞镇、中部丘陵龙山镇—石场乡、日照水库周边以及岚山区西部局部地段,与白垩纪王氏群有关;Ⅲ类土壤面积为 1.17 km²,占 0.02%,仅分布在碑廓镇北部,与 Cr 的Ⅲ类土壤分布相吻合,推测与 Cr 有相同的污染来源,即与铁矿开采污染有关。

土壤中 Pb 含量较低,土壤环境功能类型绝大多数以Ⅰ类土壤为主,面积为 5 127.24 km²,占 96.21%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 179.87 km²,占 3.39%,主要分布在墙夯水库南部七宝山金矿区、店子集镇东部铁矿和铅锌矿点区,推测与金、铁矿产伴生铅有关,另外有少量Ⅱ类土壤呈点源状分布在长岭镇南部、南湖镇北部,主要与人类活动污染有关。

土壤中 Zn 含量较低,Ⅰ类土壤面积为 5 220.39 km²,占 98.37%,分布广泛;Ⅱ类土壤面积为 86.71 km²,占区域面积的 1.63%,主要分布在墙夯水库南部七宝山金矿区,与金矿开采污染有关,另外有少量

呈点源状分布在石场乡以及日照水库南部局部地带,主要与人类生产生活活动有关。

4.2 重金属污染综合评价

4.2.1 综合评价

从表层土壤重金属污染综合评价结果(表 9)可以看出:区域内表层土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等重金属元素含量达到 I 类土壤,相当于清洁—较清洁范畴,占调查区总面积的 86.39%,这些区域土壤没有重金属污染显示,说明土壤环境质量良好;重金属含量属 II 类土壤范畴的约占调查区总面积的 13.55%,表明这些区域土壤环境已轻度污染;III 类土壤分布面积占调查区总面积的 0.06%,属于中度污染土壤,说明区域土壤中的重金属元素积累已超过临界值,有的可能已危及动植物生长及人体健康^[18],但没有出现严重污染的土壤。

表 9 土壤重金属元素污染综合评价结果

Tab. 9 Comprehensive Evaluation Results of Soil Heavy Metal Element Pollution

污染指数	污染定义	环境质量	面积/km ²	占比/%
<0.7	清洁	I 类土壤	1 199.62	22.60
0.7~1.0	较清洁	I 类土壤	3 385.22	63.79
1.0~2.0	轻度污染	II 类土壤	719.25	13.55
2.0~3.0	中度污染	III 类土壤	3.02	0.06
>3.0	重度污染	劣 III 类土壤	0.00	0.00

注:占比表示对应环境质量面积占调查区总面积的百分比。

土壤中 8 种重金属元素综合污染现状见图 4。区域内中度污染土壤呈孤点状分布在日照城区及后村镇周边,致污因子单一,前者治污因子为 Cd,后者为 Hg,均与人类生活污染有关。中度污染土壤中 Hg、Cd 等重金属元素积累已超过临界值,可能会危及动植物生长及人体健康,应注意防止环境进一步恶化^[18]。

轻度污染土壤主要分布于颤山镇—东莞镇以及龙山镇—店子镇局部地段,另外在柏松乡、户部乡以及日照水库局部地段也有零星分布。轻度污染土壤的成因主要为成土母岩、母质等自然背景,包括地层与岩性、构造与矿化等,如中生代王氏群、青山群 Cr、Cd 等元素含量较高;其次为人为作用,包括矿山开采、城区生产与生活等,如七宝山金矿污染区,中南部铁、铅矿点或矿化点周边,另外还有重金属元素在表生作用下自身地球化学性质的影响^[18]。轻度污染土壤中重金属元素已经有所积累,但还不足以危害动植物生长和人体健康,在现阶段是安全的,建

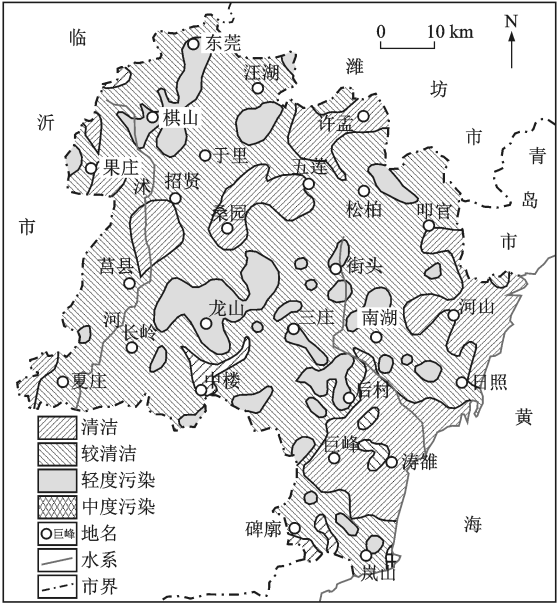


图 4 土壤重金属元素污染综合分区

Fig. 4 Comprehensive Zoning Map of Soil Heavy Metal Element Pollution

议该区要加强对各种污染源的管理,防止土壤重金属元素进一步积累^[19-20]。

目前,调查区清洁土壤面积为 1 199.62 km²,占 22.60%,较清洁土壤面积为 3 385.22 km²,占 63.79%,较清洁土壤占主导地位。未受到重金属元素污染的土壤集中分布于区域中部以及东南部广大区域,是山东日照地区重要的土壤资源分布区。

4.2.2 单元素污染评价

从土壤单元素污染评价结果(表 10)可以看出:区域内主要富集 Cd、Hg,其中 Hg 富集最强烈,其中度—重度富集区面积累计占 61.45%;其次为 Cd,中度—重度富集区面积占 13.06%;Pb、Cr、Ni、Zn、As 以未富集区为主,没有出现中度—重度富集区,而 Cu 在调查区均未富集。

(1)Hg 是危害植物生长的元素,植物体中的 Hg 主要来源于土壤,土壤中 Hg 过高,不但能在植物体内累积,还会对植物产生毒害,特别是经过生态食物链的逐级浓集,对人体构成严重损害。研究表明,土壤中 Hg 含量与鼻咽癌和乳腺癌死亡率成正相关的关系。Hg 是调查区主要的富集元素之一,以富集区为主,面积累计占 88.24%。中度富集区分布最广,主要分布在西部平原、东部市界以及三庄镇—涛雒镇一带;重度富集区主要分布在果庄乡南部、街头镇、山河镇、日照城区以及后村镇—街头镇一带;弱富集区呈条带状分布在五莲县境内、中楼镇—碑廓镇以及莒县长岭镇周边;未富集区分布在

表 10 单元素污染评价结果

Tab. 10 Evaluation Results of Single Element Pollution

元素	未富集区		弱富集区		中度富集区		重度富集区	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
As	4 994.51	94.11	312.61	5.89	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	2 977.77	56.11	1 636.68	30.84	688.07	12.97	4.59	0.09
Cr	5 262.00	99.15	45.10	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	624.41	11.77	1 421.64	26.79	2 874.22	54.16	386.84	7.29
Ni	5 304.23	99.95	2.88	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	5 236.69	98.67	70.42	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	5 274.94	99.39	32.17	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	5 307.11	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注:比例表示各元素分属各富集区的面积占调查区总面积的百分比。

五莲县境内以及墙夼水库西部。

从调查区西部 Hg 富集区呈沿沭河分布的特点来看,其与河流关系相当密切,说明沭河是携带 Hg 的主要介质。沭河将上游的 Hg 以机械颗粒物、悬浮物及溶质离子等形式带入,当沉积条件适宜时,Hg 沉淀在河道和湖积物中,便形成现在河道两侧大面积 Hg 富集土壤。另外,矿产开采及农业上大量使用含 Hg 农药也是引起 Hg 在土壤表层富集的主要原因。为防止 Hg 在土壤中富集进一步扩大和加重,主要措施就是控制产生汞工业的排污量。在 Hg 富集区,为减少作物对 Hg 的吸收,可在土壤中加入适当的化合物(如磷肥、氮肥等),以促使 Hg 转化为对人体健康无害的固定态。

(2)Cd 是典型的稀有分散元素,具有亲铜亲硫性,常产于闪锌矿及金矿中,又是亲石元素,因而也见于钙、锰氧化矿物中。Cd 是一种有毒元素,对动植物均有毒害作用。Cd 对人类的危害报道较多,骨痛病就是由慢性镉中毒引起的,镉中毒可使血压升高以及动脉粥样硬化,引起肺癌、肾癌、前列腺癌等。土壤中 Cd 中度富集区主要分布在沭河两侧的莒县—夏庄镇一带,东莞镇周边、山河镇、日照城区以及碑廓镇;重度富集区呈点源状分布在日照城区西部小型磷矿开采区,与磷矿开采污染有关,属于局部生态环境问题;弱富集区分布在沭河东部以及东南沿海一带;未富集区大面积分布在区域中南部。

Cd 富集分布态势主要与地质背景有关,富集区主要分布在中生代王氏群砂砾岩与沿海第四纪山前组砂质黏土区,这两个地质区 Cd 含量均高于调查区背景值;其次与农田污水灌溉及农药化肥使用有关,减少农药化肥的过量使用是防止表层土壤 Cd 富集加重的有效措施。土壤中 pH 值是影响植物吸

收 Cd 的因素,当土壤条件不变时,植物组织中 Cd 含量随着土壤中 pH 值的增高而降低。因此,防止土壤酸化,减小 Cd 的活性,是防止 Cd 对人体健康产生危害的有效途径。

4.2.3 综合指标评价

区域土壤重金属元素综合指标评价结果见表 11。从表 11 可以看出:区域土壤以中度富集为主,中度富集区面积占 53.27%;重度富集区占 2.60%;弱富集区占 38.63%;而未富集区仅占 5.50%。这说明区域内表层土壤中污染物已经明显积累,虽可能还未达到有害程度,但应引起重视。

表 11 综合指标评价结果

Tab. 11 Evaluation Results of Comprehensive Index

富集程度	面积/km ²	占调查区总面积的百分比/%
未富集	292.01	5.50
弱富集	2 050.24	38.63
中度富集	2 826.86	53.27
重度富集	138.00	2.60

根据土壤重金属元素综合富集程度分区(图 5),可分为 3 种不同成因类型的富集带。第一个富集带主要分布在果庄乡—莒县—夏庄镇,由 Hg、Cd 等组成,局部富集系数为 15~20,该带表层、深层土壤重金属元素分布分配特征差异明显,其富集因素可能主要与沭河携带上游的重金属元素在河道、湖积物中沉积有关。第二个富集带主要分布在人口密集的城镇地带或污水灌溉地带,以 Hg、Cd 等为主,多为中度富集,局部达重度富集,其重金属元素的富集强度明显弱于第一个富集带,该富集带在后村镇、街头镇等形成了清晰的 Hg、Cd 等浓集中心,其富集的形成主要与工业、农业活动有关。工业活动导致局部表层土壤环境出现重金属元素富集:一方面可能因为工业活动

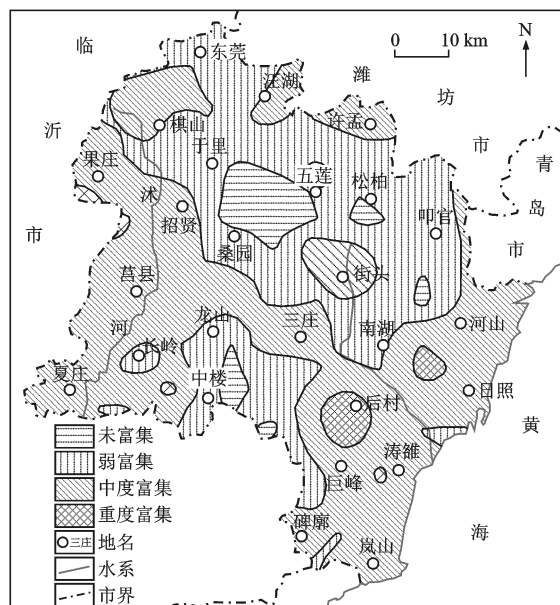


图5 土壤重金属元素综合富集程度分区

Fig. 5 Zoning Map of Comprehensive Enrichment Degree of Soil Heavy Metal Elements

本身就牵涉到一些重金属元素的排放;另一方面与工业燃煤有很大关系。农业活动导致的重金属元素富集主要与施肥和污水灌溉直接污染土壤有关。第三个富集带出现在矿集区,如墙夼水库南部七宝山金矿、街头镇西北矿区(磷矿、铁矿、铅锌矿),富集元素为Hg、Cd、Pb、Zn等,多与成矿作用产生的伴生重金属元素在表层土壤富集或矿山开采污染有关^[21]。

5 结 语

(1)山东日照地区表层土壤重金属单因子环境质量评价结果显示区域内土壤环境质量总体状况良好,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等8种重金属元素Ⅰ类土壤的面积比例分别为100.00%、98.21%、94.14%、98.10%、99.90%、89.18%、96.61%和98.37%,说明区域内土壤环境质量良好。土壤单因子环境质量平均达到Ⅰ类土壤,占土壤总面积的96.81%;Cu、Pb、Zn符合Ⅱ类土壤,占3.17%;Ⅲ类土壤仅占0.02%,说明Ⅲ类土壤占比极少。

(2)山东日照地区表层土壤重金属元素污染综合评价结果表明:反映表层土壤环境质量的As、Cu、Ni、Cd、Hg、Pb、As、Cr等8种重金属元素含量属于Ⅰ类土壤(清洁—较清洁)的占土壤总面积的86.39%,属于Ⅱ类土壤(轻度污染)的占13.55%,属于Ⅲ类土壤(中度污染)的占0.06%。这说明山东日照地区表层土壤重金属元素综合污染很少,土壤环境质量总体状况良好。

(3)山东日照地区土壤重金属元素综合指标评价结果可知:区域土壤以中度富集为主,中度富集区面积占区域总面积的53.27%;重度富集区占2.60%;弱富集区占38.63%;而未富集区仅占5.50%。这说明区域内表层土壤中污染物已有积累趋势,虽还未达到有害程度,但应引起重视。

(4)山东日照地区土壤重金属环境质量综合评价良好,但存在极少量的土壤重金属元素污染,主要污染元素是Cd、Hg,污染源主要为矿山开发活动和工业“三废”排放。因此,在贯彻“预防为主”原则基础上有必要提出土壤重金属环境质量的预防措施和治理对策。

参考文献:

References:

- [1] 陈印军,杨俊彦,方琳娜.我国耕地土壤环境质量状况分析[J].中国农业科技导报,2014,16(2):14-18.
CHEN Yin-jun, YANG Jun-yan, FANG Lin-na. Analysis of Soil Environmental Quality Status of Arable Land in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(2): 14-18.
- [2] 李洪奎,陈国栋,韩代成,等.山东昌乐土壤环境质量评价[J].地球科学前沿,2015,5(5):323-333.
LI Hong-kui, CHEN Guo-dong, HAN Dai-cheng, et al. Soil Environment Quality Assessment in Changle, Shandong [J]. Advances in Geosciences, 2015, 5(5): 323-333.
- [3] APPLETON J D, RIDGWAY J. Regional Geochemical Mapping in Developing Countries and Its Application to Environmental Studies [J]. Applied Geochemistry, 1993, 8(2): 103-110.
- [4] GOOVAERTS P. Geostatistics in Soil Science: State of the Art and Perspectives [J]. Geoderma, 1999, 89(1/2): 1-45.
- [5] MCLAUGHLIN M J, PARKER D R, CLARKE J M. Metals and Micronutrients—food Safety Issues [J]. Field Crop Research, 1999, 60(1/2): 143-163.
- [6] YANG Q W, SHU W S, QIU J W, et al. Lead in Paddy Soils and Rice Plants and Its Potential Health Risk Around Lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China [J]. Environment International, 2004, 30(7): 883-889.
- [7] 韩平,王纪华,陆安祥,等.北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J].农业环境科学学报,2012,31(1):106-112.
HAN Ping, WANG Ji-hua, LU An-xiang, et al. Distribution and Environment Quality Evaluation of Heavy Metals in Soil in Shunyi of Beijing, China [J]. Journal

- of Agro-environment Science, 2012, 31(1): 106-112.
- [8] 阎鹏, 徐世良, 曲克健, 等. 山东土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- YAN Peng, XU Shi-liang, QU Ke-jian, et al. Shandong Soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.
- [9] 高怀友, 赵玉杰, 师荣光, 等. 区域土壤环境质量评价基准研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增): 342-345.
- GAO Huai-you, ZHAO Yu-jie, SHI Rong-guang, et al. Study on the Reference Values for Regional Soil Environment Quality Assessment[J]. Journal of Agro-environment Science, 2005, 24(S): 342-345.
- [10] 陈怀满, 郑春蓉, 周东美, 等. 土壤环境质量研究回顾与讨论[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 821-827.
- CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Soil Environmental Quality: A Review[J]. Journal of Agro-environment Science, 2006, 25(4): 821-827.
- [11] 周国华, 秦绪文, 董岩翔, 等. 土壤环境质量标准的制定原则与方法[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 721-727.
- ZHOU Guo-hua, QIN Xu-wen, DONG Yan-xiang, et al. Soil Environment Quality Standards: Principle and Method[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(8): 721-727.
- [12] 杜艳, 常江, 徐笠. 土壤环境质量评价方法研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 749-756.
- DU Yan, CHANG Jiang, XU Li. Progress on Assessing Methods of Soil Environmental Quality[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 749-756.
- [13] 代杰瑞, 崔元俊, 庞绪贵, 等. 山东省东部地区农业生态地球化学调查与评价[J]. 山东国土资源, 2011, 27(5): 1-7.
- DAI Jie-rui, CUI Yuan-jun, PANG Xu-gui, et al. Survey and Evaluation of Agricultural Ecological Geochemistry in Eastern Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2011, 27(5): 1-7.
- [14] 代杰瑞, 庞绪贵, 宫玉新, 等. 山东威海农业生态地球化学调查与评价[J]. 地质通报, 2010, 29(9): 1391-1398.
- DAI Jie-rui, PANG Xu-gui, GONG Yu-xin, et al. Agro-ecological Geochemistry Survey and Evaluation of Weihai City, Shandong Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(9): 1391-1398.
- [15] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- LI Zuo-yong, DING Jing, PENG Li-hong. The Principle and Method of Environmental Quality Assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [16] 林成谷. 土壤污染与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- LIN Cheng-gu. Soil Pollution and Prevention[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [17] 李雪梅, 邓小文, 王祖伟, 等. 污染因子权重及区域环境质量综合评价分级标准的确定: 以土壤重金属污染为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 97-100.
- LI Xue-mei, DENG Xiao-wen, WANG Zu-wei, et al. Determination of Weight of Polluted Factors and Grading Standards of Comprehensive Assessment of Regional Environmental Quality: A Case of Soil Heavy Metal Pollution[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 97-100.
- [18] 李洪奎, 钟杰, 亓朝晖, 等. 昌乐县地质矿产资源开发利用研究[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- LI Hong-kui, ZHONG Jie, QI Chao-hui, et al. Development and Utilization of Geological Mineral Resources in Changle[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [19] 关卉, 万洪富, 王洗民, 等. 雷州半岛土壤重金属分析特征及其污染评价[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(10): 757-760, 771.
- GUAN Hui, WAN Hong-fu, WANG Xian-min, et al. Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil Samples of Leizhou Peninsula[J]. Environment Pollution and Control, 2006, 28(10): 757-760, 771.
- [20] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 等. 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 266-269.
- LI Bo, LIN Yu-suo, ZHANG Xiao-fei, et al. Pollution of Heavy Metals in Soil and Agricultural Products on Sides of Ninglian Superhighway[J]. Journal of Agro-environment Science, 2005, 24(2): 266-269.
- [21] 庞绪贵, 崔元俊, 王晓梅, 等. 山东省生态地球化学调查与评价综述[J]. 山东国土资源, 2013, 29(9): 10-15.
- PANG Xu-gui, CUI Yuan-jun, WANG Xiao-mei, et al. Survey and Evaluation on Eco-geochemistry in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(9): 10-15.