

代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济南市土壤元素地球化学特征及环境质量[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 308–316.

Dai Jierui, Zhu Decheng, Pang Xugui, et al. Geochemical characteristics and environmental quality of soil elements in Jinan City[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 308–316(in Chinese with English abstract).

## 济南市土壤元素地球化学特征及环境质量

代杰瑞 祝德成 庞绪贵 杨丽芝 彭观峰 宁振国

(山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 以济南市土壤为研究对象, 采用 R-2.6.1 程序、半方差函数模型和因子分析法对区内土壤元素含量统计特征、结构特征和分布特征进行了分析研究, 并对土壤环境质量进行评价。结果表明: 研究区土壤中多数元素含量总体受自然空间格局控制, 但人类活动对市区土壤 Cd、Hg、Pb、Se、As、pH 值等元素(指标)含量有明显影响, 表层土壤 pH 值呈现从外围向市区中心增加的碱化趋势; 盛行风向对表层土壤重金属的分布叠加也产生影响, 沿顺风向产生漂移。受人类活动(主要为工业污染)历史长短及强度的不同, 济南市区、历城区和章丘市总体为轻度污染, 局部存在 Hg、Cu、Cr、Cd 等中度或重度污染, 污染区分布与各类工业空间布局相吻合, 而长清、济阳土壤环境质量较好, 总体属警戒限级。按土壤综合污染指数排序, 土壤综合环境质量从优到劣为济阳>长清>章丘>历城>市区。

**关键词:** 土壤; 因子分析; 分布特征; 环境质量; 济南市

**中图分类号:** P595; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)01-0308-09

## Geochemical characteristics and environmental quality of soil elements in Jinan City

DAI Jie-rui, ZHU De-cheng, PANG Xu-gui, YANG Li-zhi,  
PENG Guan-feng, NING Zhen-guo

(Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, Shandong, China)

**Abstract:** Taking the soil of Jinan as the study object, the authors used software R-2.6.1, semivariance function model and factor analysis methods to study the characteristics, structures and distribution of elements content, and evaluated soil environment quality. According to the results achieved, the majority of soil elements in the study area are controlled by natural factors; nevertheless, indicators like Cd, Hg, Pb, Se, As and pH in urban soils are impacted by human activities significantly, pH values in surface soil exhibit an increasing trend (alkalization trend) from the periphery to the urban center, and prevailing wind, which drifts in the downwind direction, also has an impact on the distribution superimposition of heavy metals in surface soils. Influenced by different time spans and intensities of human activities (mainly industrial pollution), the soil environment quality of Jinan urban area, Licheng district and Zhangqiu are generally lightly polluted, with local areas moderately or severely polluted by Hg, Cu, Cr, Cd, and the pattern of the pollution distribution is consistent with the layout of the industrial areas; however, the soil environmental quality of Changqing and Jiyang are fairly good, generally within the warning limits. According to the soil comprehensive environmental

**收稿日期:** 2014-01-24; **改回日期:** 2014-05-01

**基金项目:** 部省合作项目(1212010310306)资助。

**作者简介:** 代杰瑞, 男, 1977 年生, 高级工程师, 主要从事生态地球化学调查和地球化学勘查技术应用研究工作; E-mail: daijierui@sohu.com。

quality indices, the soil quality becomes gradually worsen in order of Jiyang (0.73), Changqing (0.82), Zhangqiu (0.95), Licheng (1.03), urban area (1.10).

**Key words:** soil; factor analysis; distribution characteristics; environment quality; Jinan City

**About the first author:** DAI Jie-rui, male, born in 1977, senior engineer, mainly engages in the study of agro-ecological geology and geochemical exploration technology, E-mail: daijierui@sohu.com.

城市是一个复杂、开放的生态系统,是人类文明的产物。城市的形成和发展是人类社会发展的集中缩影,作为一个人口集中、物质能量和信息高度密集的最活跃的生态系统,一方面城市发展推动经济和社会发展,另一方面也或多或少的对所在的城市区域环境带来污染甚至破坏。在城市这个复杂的开放系统中,城市土壤则处于城市生态系统的核心位置。评价和研究城市土壤重金属污染特征、污染来源以及在环境中迁移、转化机理,并对城市环境污染治理和城市进一步的发展规划提出科学建议,不仅有利于城市生态环境良性发展,也有利于人类社会健康和城市可持续发展<sup>[1-5]</sup>。

本文以2003—2006年开展的“山东省黄河下游流域多目标区域地球化学调查”为依托,以生态地球化学理论、系统科学理论和城市规划理论为指导,通过收集其他相关资料,在对济南市开展土壤地球化学特征研究基础上,进行土壤环境质量评价,探索城市规划发展与土壤生态地球化学环境变化的相互作用,这对济南市经济规划发展具有重要的理论和实际意义。

## 1 研究区概况

济南市是山东省政治、经济、文化、科技、教育和金融中心,也是中国重要的工业城市。在“工业立市”政策的指导下,济南市已初步形成了门类齐全、结构完整的工业体系,其中冶金、机械、轻纺、化工、电子、建材、医药、食品等行业在全国具有举足轻重的地位。随着近30年来快速城市化和工业化发展,石油化工、钢铁冶炼、热电等企业规模不断扩大,近10年来建筑业也发展迅速,机动车保有量急剧增加。这些污染源将大量有机和无机污染物带入到城市环境中,造成对城市环境的污染,土壤则成了这些污染物的主要承载者。

济南地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,地势南高北低。地形可分为3带:北部

临黄带,中部山前平原带,南部丘陵山区带。境内水系发育,泉水众多,河网纵横,交通便利。一年之中,在不同季节,济南市处在不同大气环流控制之下,秋冬两季亚洲大陆北部形成了蒙古高压,济南被极地大陆气团所控制,常受来自北方冷空气侵袭,多为偏西北风;夏季受热带、副热带海洋气团影响,盛行来自海洋的暖湿气流,风向多偏东南风,盛行风向对污染物迁移产生影响。山地丘陵区40%,广泛发育寒武—奥陶纪灰岩、白云岩等,岩石风化残积物多形成褐土、潮褐土和钙质粗骨土,局部地段发育有新太古代和古元古代花岗质片麻岩和二长花岗岩。第四系覆盖区约占60%,更新统以残坡—坡洪积为主,全新统则以冲积为主,土壤主要为潮土、盐化潮土和湿潮土<sup>[6]</sup>。

## 2 工作方法

### 2.1 样品采集与分析

多目标调查在济南及其市区以1件/km<sup>2</sup>的密度采集0~20 cm深度的土壤样品1529件,同时以1件/km<sup>2</sup>的密度采集150~200 cm深度范围内土壤样品375件;并按4个相邻网格(表层样4 km<sup>2</sup>,深层样16 km<sup>2</sup>)的样品组合为一个样进行测试。样品由武汉岩矿测试中心采用X射线荧光光谱、等离子光谱、氢化物原子荧光光谱、发射光谱等一整套大型精密仪器进行测试,分析SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、K<sub>2</sub>O、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Br、Cd、Ce、Cl、Co、Cr、Cu、F、Ga、Ge、Hg、I、La、Li、Mn、Mo、N、Nb、Ni、P、Pb、Rb、S、Sb、Sc、Se、Sn、Sr、Th、Ti、Tl、U、V、W、Y、Zn、Zr、C、有机碳和pH值,共54项指标。

采用了标准样、密码样、监控样等多种监控手段,保证了分析质量的可靠性,测试质量通过了中国地质调查局专家组的验收。

### 2.2 数据处理及图件编制

采用中国地质调查局发展研究中心开发的GeoMdis地球化学信息系统和R-2.6.1程序对研究

区及其所包含的分区(济南市区、济阳、历城、章丘、长清)土壤元素分别进行统计,了解其统计特征。土壤地球化学基准值的求取首先对数据频率分布形态进行正态检验。服从正态或对数正态分布的,分别用算术平均值和几何平均值代表基准值;不服从正态分布的,则按算术平均值加减3倍标准离差反复剔除,平均值或几何平均值代表基准值;剔除后仍不满足正态分布的,则以众值代表基准值。背景值的求取方法与基准值相同。利用中国地质大学研制的MapGis软件制作地球化学图以及综合评价图和解释图件。

### 3 土壤地球化学特征

#### 3.1 土壤元素含量统计特征

济南市土壤基准值与背景值地球化学参数见表1。

除缺少背景值数据的元素外,济南市土壤元素

基准值(主要是重金属)与全国土壤C层丰度相比,Cd、Cr基准值是全国土壤C层丰度的1.27倍和1.11倍,As、Zn、Pb、Hg、Se基准值偏低,其余Cu、F、Ni、Mn、Co等元素基准值与全国土壤丰度差别不大。济南市元素背景值与全国土壤A层丰度相比,Cd、Cu、Cr、F、Ni、pH、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O为全国土壤A层丰度的1.13~2.09倍,其中Cd为全国土壤丰度的1.59倍,Se、Hg、I、OrgC背景值是全国丰度的50%~76%,所缺乏的元素中,除Hg外,其余为动植物营养元素或有益元素,这种现象应引起重视。

与深层土壤相比,济南市表层土壤中OrgC、Se、N、Hg、S、C、Cd、Pb、Zn等元素或指标含量高于深层土壤,其中表层土壤中OrgC、Se、N、Hg、P、S含量是深层土壤的1.58~2.97倍,且表深土壤中这些元素的相关系数均小于0.3,反映了成土过程和人类活动对自然成分的改造是极其显著的,表层土壤中Cd、Se、Hg、N、P、S、OrgC等元素含量明显增高与工农业生

表1 济南市土壤背景值和基准值地球化学参数统计

Table 1 Geochemical parameter statistics of background and baseline values of soil in Jinan

指标	深层土壤(150~200 cm)					表层土壤(0~20 cm)					富集系数	相关系数
	样品数	基准值	变异系数	全省C层	全国C层 <sup>[7]</sup>	样品数	背景值	变异系数	全省A层	全国A层		
As	364	10.1	0.207	9.3	11.5	1523	10.2	0.218	9.3	11.2	1.05	0.389
Cd	369	0.107	0.23	0.083	0.084	1483	0.154	0.232	0.084	0.097	1.46	0.065
Co	369	12.7	0.185	14.8	13.4	1491	12.8	0.175	13.6	12.7	1.01	0.534
Cr	357	67.7	0.127	70	60.8	1439	69.7	0.14	66	61	1.04	0.291
Cu	366	25.1	0.221	24.5	23.1	1476	26.0	0.203	22.4	22.6	1.03	0.492
F	355	537	0.12	550	507	1459	563	0.109	506	478	1.02	0.439
Hg	349	0.019	0.308	0.015	0.044	1382	0.038	0.387	0.019	0.065	1.95	0.020
Mn	369	589	0.154	551	597	1510	583	0.13	550	583	0.99	0.220
Ni	369	29.7	0.162	29.4	28.6	1473	30.4	0.151	25.8	26.9	1.01	0.391
P	368	556	0.163	-	-	1496	905	0.202	280	-	1.63	0.240
Pb	370	20.3	0.139	25.3	24.7	1479	24.4	0.156	25.8	26	1.21	0.355
Zn	373	61.6	0.145	71.4	71.7	1484	69.6	0.137	50	74.2	1.12	0.224
Se	348	0.10	0.293	0.08	0.25	1457	0.22	0.303	0.13	0.29	2.19	0.346
I	365	1.78	0.369	-	-	1459	1.87	0.265	3.04	3.76	1.05	0.513
N	373	0.049	0.425	-	-	1491	0.102	0.227	0.059	-	2.08	0.411
C	367	1.14	0.46	-	-	1476	1.69	0.297	-	-	1.48	0.370
S	362	147	0.198	-	-	1430	233	0.244	-	-	1.58	0.165
OrgC	360	0.33	0.58	-	-	1489	0.98	0.322	0.54	1.8	2.97	0.446
pH	375	8.33	0.038	-	-	1529	7.95	0.058	7.7	6.7	0.96	0.560
SiO <sub>2</sub>	375	60.64	0.072	-	-	1529	60.02	0.062	-	-	0.99	0.399
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	374	13.17	0.107	-	-	1529	12.76	0.089	12.51	12.51	0.97	0.646
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	375	4.66	0.157	-	-	1516	4.69	0.139	2.34	4.2	1.01	0.533
MgO	356	1.76	0.148	-	-	1453	1.77	0.141	1.33	1.29	1.01	0.397
CaO	365	4.53	0.41	-	-	1503	4.50	0.386	2.34	2.15	1.03	0.345
Na <sub>2</sub> O	369	1.72	0.193	-	-	1437	1.68	0.174	2.08	1.37	0.98	0.617
K <sub>2</sub> O	367	2.33	0.088	-	-	1478	2.33	0.086	2.3	2.24	1.00	0.433

注:深层土壤样品总数375,表层土壤原始样品总数1529,氧化物、总碳、有机碳、N含量为%,Au为10<sup>-6</sup>,其余元素为10<sup>-6</sup>,表中变异系数指原始数据的变异系数。

产有密不可分的联系。此外发现As、Co、Cr、Cu、F、I、Ni、Mn、pH和Al、Fe、K、Mg等氧化物含量与深层土壤近乎相等,且与深土壤中相应元素(指标)的相关系数均大于0.4,人类活动对其影响相对较小;表土CaO虽然也与深层土壤含量接近(富集系数1.03),但其变异系数高达0.386,说明表土CaO分布不均,特别人口密集的市区含量偏高。

研究区表层土壤元素(主要为重金属)含量对比见表2,总体看,历城区的Cr、Cd、Zn,济南市区的As、Hg、Pb、Se、Cd、CaO比长清、济南和章丘市要高,这与市区车流量大,化工冶金工业较多密切相关。土壤pH值虽不是元素,但却是表征土壤综合性非常重要的一个指标,从表2中可以看出,济南市区表层土壤pH值(8.15)均比长清区(7.63)、章丘市(7.91)等土壤背景值略高(碱化);市区表层土壤CaO含量是其他地区背景值的1.09~1.61倍,CaO和CaCO<sub>3</sub>是石灰、水泥建筑降尘的特征元素,这类偏碱性物质向表层土壤释放可能是导致城市土壤碱化的原因之一。

与国内其他城市相比,Pb、Zn、Cd、Cu含量要明显低于长沙、成都、洛阳及香港等开发历史较长、经济较发达的城市。除Hg外,5地区各元素含量均高于开发历史较短的深圳市。这在一定程度上说明除区域背景值差异外,人类活动(主要为工业污染)历史长短及强度是影响城市土壤重金属累积程度的重要原因。

## 3.2 土壤元素含量空间分布特征

### 3.2.1 土壤元素含量空间结构特征

1962年,法国地质学家Matheron提出了地统计学<sup>[13-14]</sup>。地统计学以半方差函数为主要工具,借助GS+7软件对济南市表层土壤中重金属As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni等进行函数拟合并确定拟合参数。各元素拟合参数见表3。

自然过程是土壤属性空间变异的内在动力,它有利于土壤属性空间变异结构性的加强和相关性的提高;而人为过程则是土壤属性变异的外在影响因素,它对变量空间变异的结构性相关性具有消弱作用。变程 $a$ 大,决定系数( $R^2$ )大,块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 小,反映元素受自然因素影响明显,反之则受人活动影响较大。

从表3中可以看出,章丘市Cu、As,历城Se,济南Zn、As元素块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 均小于等于25%,另外从决定系数( $R^2$ )和残差平方和( $RSS$ )可以看出,上述元素含量的半方差函数与模型拟合程度较好,反映了表层土壤中上述元素虽受到一定程度人为因素影响但主体仍然受自然因素控制,原有空间格局尚未遭到严重破坏;虽然市区Cu、Se、Pb块金效应也小于25%,但变程相对较小,在同样情况下市区土壤中这些元素含量受人活动干扰更明显些。市区Cd、As、Ni、Hg,历城区Pb、Ni、Hg、Cd、Cr,章丘市Hg、Pb、Cd,长清区Se、Pb、Cu和济阳县Cr、Pb、Cd元素块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 介于35%~50%,

表2 不同地区城市土壤重金属含量对比

Table 2 Comparisons of heavy metals in soil between different areas and cities

城市	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Mn	F	Se	CaO	pH	数据来源	
济南市	市区(N=438)	11.7	0.20	81.2	26.3	0.161	28.4	30.6	77.5	555	509	0.35	6.44	8.15	本文
	历城区(N=388)	10.7	0.20	84.9	28.7	0.073	34.4	26.8	82.6	603	578	0.29	4.59	7.98	本文
	长清区(N=304)	9.1	0.16	67.8	25.8	0.035	30.9	22.9	69.9	561	591	0.19	4.00	7.63	本文
	章丘市(N=422)	10.2	0.17	77.1	29.2	0.078	32.9	26.6	70.6	609	574	0.29	4.13	7.91	本文
	济阳县(N=277)	11.6	0.13	65.2	22.4	0.033	28.9	23.9	65.9	586	579	0.17	5.92	8.01	本文
深圳(N=84)	9.0	0.07	27.8	10.8	0.104	-	20.9	59.0	208	-	-	-	-	-	[8]
长沙(N=110)	32.8	6.90	121.0	51.3	0.410	-	89.4	276.0	-	-	-	-	-	-	[9]
成都(N=168)	13.2	0.21	79.5	46.6	0.480	-	50.8	128.6	-	-	-	-	-	-	[10]
洛阳(N=20)	-	1.30	104.2	111.3	-	-	257	364.2	539	-	-	-	-	-	[11]
杭州(N=20)	-	3.40	63.3	93.0	-	-	134.1	282.9	572	-	-	-	-	-	[11]
太原(N=462)	10.4	0.15	75.3	27.1	0.088	-	26.6	81.2	-	-	-	-	-	-	[12]
香港(N=594)	-	2.18	-	24.8	-	-	93.4	148.0	-	-	-	-	-	-	[1]

表3 表层土壤元素半方差函数模型与参数

Table 3 Semivariance function model and parameters of surface soil elements

元素	地区	模型	$C_0$	$C_0+C$	变程 $a/\text{km}^2$	$C_0/(C_0+C)/\%$	决定系数( $R^2$ )	RSS
As	市区	球型	1.73	4.12	16.46	41.9	0.983	0.0638
	历城	球型	1.50	5.59	23.7	26.9	0.968	0.736
	章丘	指数	1.43	5.87	119.19	24.4	0.959	0.332
	长清	高斯	2.72	10.44	52.62	26	0.946	1.01
	济阳	指数	1.33	5.39	24.54	24.7	0.911	0.956
Cd	市区	球型	0.002	0.006	11.7	37.7	0.587	$4.23 \times 10^{-6}$
	历城	球型	0.036	0.07	8.45	49.9	0.841	$1.11 \times 10^{-4}$
	章丘	球型	0.001	0.003	81	40.1	0.863	$3.04 \times 10^{-7}$
	长清	指数	0.00006	0.001	4.53	4.6	0.618	$3.43 \times 10^{-8}$
	济阳	球型	0.00045	0.0009	31.15	49.9	0.944	$1.19 \times 10^{-8}$
Cr	市区	球型	180	4167	10.82	4.3	0.850	1320660
	历城	球型	307	614	7.32	50	0.520	30446
	章丘	指数	282	1075	146.85	26.2	0.694	104128
	长清	高斯	25.7	252	2.72	10.2	0.181	1985
	济阳	球型	18.5	40.59	22.8	45.7	0.959	21.1
Cu	市区	球型	8.2	66.09	12.19	12.4	0.858	294
	历城	指数	21.1	59.17	118.32	35.7	0.743	175
	章丘	球型	19.7	120	69.13	16.4	0.991	54.8
	长清	指数	12.3	24.69	14.19	50	0.844	8.88
	济阳	球型	3.89	12.32	26	31.6	0.965	2.69
Hg	市区	球型	0.015	0.04	7.37	50	0.350	$2.12 \times 10^{-4}$
	历城	指数	0.00055	0.001	40.92	49.1	0.941	$1.65 \times 10^{-8}$
	章丘	线性	0.143	0.14	33.87	100	0.306	$2.12 \times 10^{-3}$
	长清	指数	0.00003	0.0004	4.95	7.1	0.340	$1.04 \times 10^{-8}$
	济阳	指数	0.00003	0.0002	6.6	17.6	0.663	$7.01 \times 10^{-10}$
Ni	市区	球型	9.34	20.03	15.02	46.6	0.943	4.32
	历城	球型	45.4	91.3	8.13	48.1	0.560	858
	章丘	指数	62.3	269	243	23.1	0.537	5550
	长清	指数	0.6	46.54	4.23	1.3	0.446	63.3
	济阳	球型	4.99	16.67	23.36	29.9	0.962	5.53
Pb	市区	球型	35.6	212	12.57	16.8	0.824	3633
	历城	球型	22.0	55.63	71	39.5	0.915	50
	章丘	球型	18.8	49.63	81	37.8	0.923	36.4
	长清	指数	4.36	8.72	11.67	50	0.899	0.574
	济阳	球型	4.66	9.36	25.29	49.8	0.978	0.517
Zn	市区	球型	594	1966	10.95	30.2	0.462	1003431
	历城	指数	40.0	398	4.14	10.1	0.394	11342
	章丘	高斯	58.7	195	68.17	30.1	0.968	270
	长清	指数	2.0	79.89	4.29	2.5	0.777	49.9
	济阳	球型	24.0	98	25.2	24.5	0.973	157
Se	市区	球型	0.005	0.04	12.76	12.9	0.814	$1.40 \times 10^{-4}$
	历城	指数	0.003	0.017	63.45	16.6	0.989	$1.59 \times 10^{-6}$
	章丘	指数	0.004	0.013	50.55	28.5	0.893	$8.57 \times 10^{-6}$
	长清	球型	0.00081	0.002	12.18	49.7	0.743	$1.12 \times 10^{-7}$
	济阳	指数	0.00008	0.0006	6.66	12.1	0.522	$2.44 \times 10^{-8}$

反映受人为因素(污染、人类活动扰动等)影响较大,元素的空间分布受自然和人为因素共同影响。

3.2.2 土壤元素空间分布及其影响因素

主成分分析是一种通常用于环境研究的多变量统计方法,它能有效降低实测变量和揭示变量之间的相互关系。通过SPSS软件对数据进行主成分分析,得到大于1的特征值4个(表4),与其对应的4个主成分累积贡献率为74.61%。第1主成分代表的变量组合为Cd、Pb、Zn、Se;第2主成分代表的变量组合为Cr、Ni、Cu;第3主成分代表Hg;第4主成分主要代表变量As。主成分中的元素组合说明这些元素的来源具有一定的相关性,并有效指示了土壤的物质来源或迁移途径。

利用常用的克里格(Kriging)插值,使用MapGIS6.7绘制了研究区表层土壤F1、F2因子得分分布图和Hg、As等元素地球化学图(图1~4)。

F1因子与Cd、Pb、Se、Zn显著相关,与深层土壤背景值对比,他们都具有较高的含量或较大的变异系数(表1),说明表层土壤元素受到污染。从F1空间分布(图1)来看,得分高值区主要分布在长途汽车站以东以热电厂为核心的椭圆状区域。历城高含量区分布于王舍人镇化工、医药、造纸、钢铁冶炼和垃圾填埋场附近。章丘市也有几处高值岛状区分

表4 济南市土壤因子负载矩阵  
Table 4 The matrix of soil factor loadings of Jinan

元素变量	因子负载			
	因子1	因子2	因子3	因子4
Cd	0.732	-0.211	-0.123	-0.074
Cr	0.445	0.758	0.009	0.040
Pb	0.721	-0.263	-0.074	0.081
Zn	0.733	-0.291	-0.312	-0.145
Ni	0.255	0.778	-0.345	-0.156
As	0.351	0.158	0.558	0.650
Hg	0.171	0.070	0.692	-0.676
Se	0.740	-0.061	0.191	0.015
Cu	0.154	0.700	0.256	0.012
特征值	2.56	1.41	1.06	0.94
贡献率/%	31.94	17.65	13.29	11.73
累计贡献率/%	31.94	49.59	62.88	74.61

布,实地调查发现多位于化工厂、机械厂和医药厂等企业周边。济阳县垛石镇点源状异常中心为造纸厂,高值点是否与此有关还需进一步调查。Cd、Pb、Zn与Se进入同一因子,他们可能具有相同来源,Se是燃煤指示元素,研究发现市区、钢铁冶炼厂和化工厂附近的土壤样点具有最高的Cd含量( $0.84 \times 10^{-6}$ )和较高的Se( $2.16 \times 10^{-6}$ )、Pb( $75.8 \times 10^{-6}$ )含量,因此工业燃煤是导致市区上述元素污染的主要来源。从全局看,较高含量区范围与市区范围极其

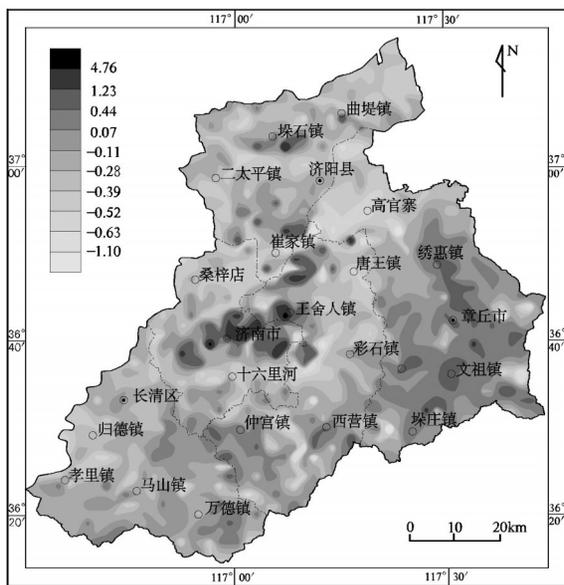


图1 济南市表层土壤F1因子得分分布图  
Fig.1 The score map of Factor 1 in surface soil of Jinan

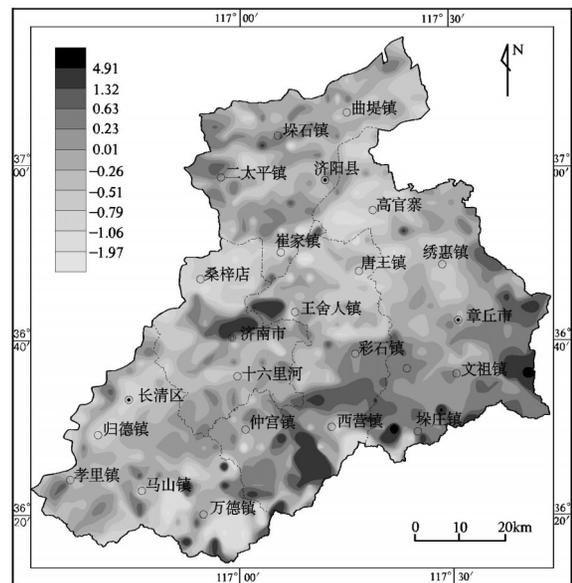


图2 济南市表层土壤F2因子得分分布图  
Fig.2 The score map of Factor 2 in surface soil of Jinan

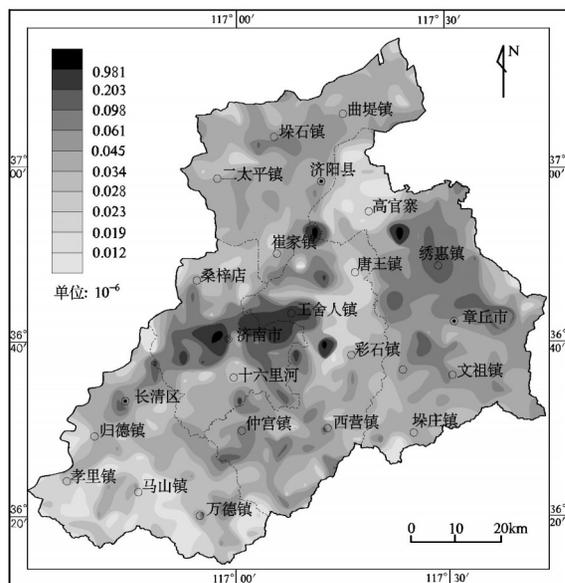


图3 济南市表层土壤Hg元素地球化学图  
Fig.3 The distribution of Hg in surface soil of Jinan

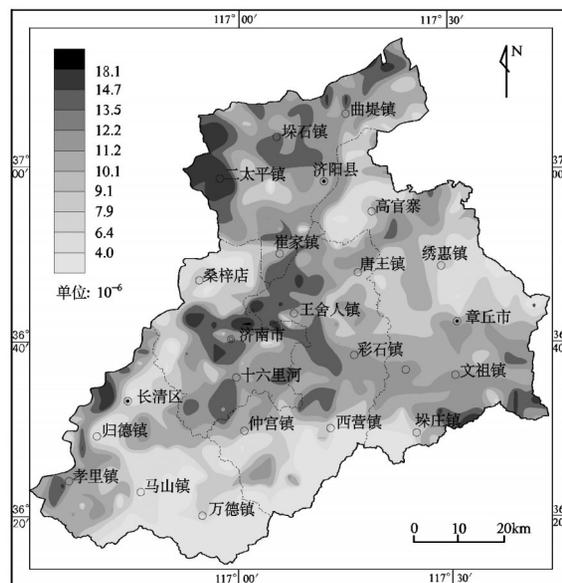


图4 济南市表层土壤As元素地球化学图  
Fig.4 The distribution of As in surface soil of Jinan

吻合,居民生活排污、机动车尾气和其他企业污染也不容忽视。

F2因子与Cr、Ni、Cu显著相关,从F2因子得分分布图(图2)可以看出,因子高分值区与市区企业分布范围及其吻合,特别在化工厂、热电厂和钢铁厂以及人口密集区得分最高,且远高于其他地区。分布在研究区东部和南部岛状或带状异常则与花岗岩质片麻岩、火山岩的高背景有关。

F3因子仅与Hg显著相关,F4因子仅与As显著相关。说明Hg和As与其他元素相关性均较差,主要来源与其他元素差别明显,且来源可能更为广泛。从Hg元素地球化学图(图3)可见,市区、历城和长清高含量区与人口密集区相吻合,章丘市带状高值区与西侧文祖隐伏深断裂区域构造线方向一致,是否构造活动对Hg的成因有叠加影响还需进一步研究。市区表层土壤As含量高值区分布在热电厂为核心的椭圆状区域(图4),济阳西部高值区附近有化工类、污水处理类、食品加工类等多家企业。

在整个研究区内,表层土壤中重金属含量均呈现从高含量区域为中心向四周逐渐递减,无明显方向性的特征。多数高含量区与主要工业区分布相吻合。研究区冬季整体盛行西北风,而夏季盛行东南风,各元素空间含量分布具有在一定范围上不一

分明显的向下风向漂移的羽状形态(图1~4),这说明重金属工业废物除了直接随污水和固废堆放进入土壤外,同时还随废气废尘通过大气干湿沉降等方式进入到土壤。由于重金属元素比重较大,飘移距离不大,这一现象并不十分明显。

## 4 土壤环境质量评价

### 4.1 评价方法

以网格作为基本评价单元,将调查获得的1个/4 km<sup>2</sup>土壤中pH值、Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni各元素含量数据,根据下式判定各元素在每个测点上的环境质量指数。

$$Z_i = X_i / C_i \quad (X_i \leq C_i)$$

$$Z_i = 1 + (X_i - C_i) / (C_{IIa} - C_i) \quad (C_i < X_i \leq C_{IIb}, \text{pH} \leq 6.5)$$

$$Z_i = 1 + (X_i - C_i) / (C_{IIb} - C_i) \quad (C_i < X_i \leq C_{IIb}, 6.5 < \text{pH} \leq 7.5)$$

$$Z_i = 2 + (X_i - C_{IIa}) / (C_{III} - C_{IIa}) \quad (C_{IIa} < X_i \leq C_{III}, \text{pH} \leq 6.5)$$

$$Z_i = 2 + (X_i - C_{IIb}) / (C_{III} - C_{IIb}) \quad (C_{IIb} < X_i \leq C_{III}, 6.5 < \text{pH} \leq 7.5)$$

$$Z_i = 2 + (X_i - C_{IIc}) / (C_{III} - C_{IIc}) \quad (C_{IIc} < X_i \leq C_{III}, \text{pH} > 7.5)$$

$$Z_i = 3 + (X_i - C_{III}) / C_{III} \quad (X_i > C_{III})$$

式中,  $Z_i$ —单因子分指数,无量纲;

$X_i$ —单因子*i*的实测值;

$C_{I}$ —土壤潜在污染累积起始值;  
 $C_{IIa}$ —土壤pH $\leq 6.5$ 时单因子轻污染累积起始值;  
 $C_{IIb}$ —土壤 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 时单因子轻污染累积起始值;  
 $C_{IIc}$ —土壤pH $> 7.5$ 时单因子轻污染累积起始值;  
 $C_{III}$ —单因子重污染起始值。  
 $C_{I}$ 、 $C_{II}$ 、 $C_{III}$ 参考国家土壤环境质量标准(GB15618-1995)中一级、二级、三级标准确定。

采用尼梅罗综合指数法进行综合环境质量评价,其计算公式为:

$$Z_{\text{综}} = [(Z_{\text{ave}}^2 + Z_{\text{max}}^2) / 2]^{1/2}$$

式中:  $Z_{\text{综合}}$ —土壤综合污染指数;

$Z_{\text{imax}}$ —单因子分指数最大值;

$Z_{\text{iave}}$ —单因子分指数平均值。

评价分级标准见表6。

表6 综合指数评价分级标准

Table 6 The grading standards of soil comprehensive environmental quality

综合指数	$Z_{\text{综}} \leq 0.7$	$0.7 < Z_{\text{综}} \leq 1.0$	$1.0 < Z_{\text{综}} \leq 2.0$	$2.0 < Z_{\text{综}} \leq 3.0$	$Z_{\text{综}} > 3.0$
污染等级	清洁	警戒限	轻度污染	中度污染	重度污染
质量等级	一级	一级	二级	三级	劣三级

### 4.2 评价结果

尼梅罗综合指数综合指数计算结果表明,除市区和历城整体属轻度污染外,其余地区属警戒限范畴,按平均综合污染指数排序,环境质量从优到劣为济阳(0.73)>长清(0.82)>章丘(0.95)>历城(1.03)>济南(1.10)。利用 MapGIS 6.7 制作了全区表层土壤综合污染分区图(图5),由图可见,研究区环境质量良好,中度和重度污染区仅占研究区面积的2.15%,中度污染主要位于市区化工厂、热电厂和钢铁总厂附近,局部达重度污染,污染元素主要为Hg、Cu、Cr、Cd、Ni,这与这些企业工业燃煤和粉尘、废水、废渣排放密切相关。轻度污染区与市区范围相吻合,另外呈大面积片状分布在东部和南部,主要与基岩区的Cd、Cr、Cu、Ni较高含量背景有关。

## 5 结论

(1)与全国土壤A层丰度值对比,济南市Cd、Cu、Cr、F、Ni、pH、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O等元素(指标)含

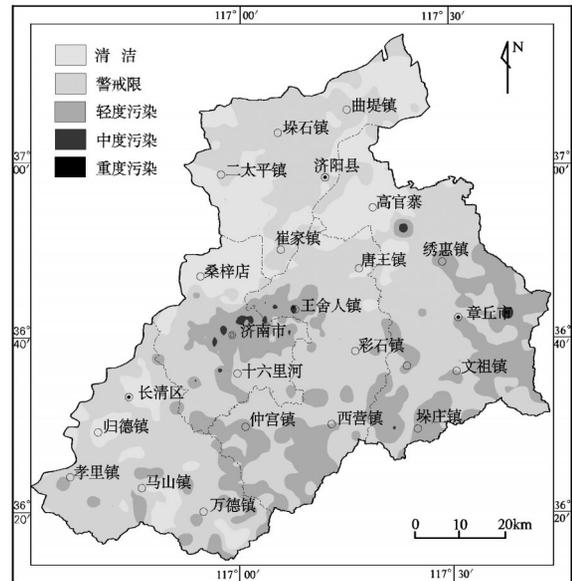


图5 济南市土壤综合污染分区图

Fig.5 The soil pollution regionalization map of Jinan

量偏高,而Se、Hg、I、OrgC偏低。从表层与深层土壤元素含量对比来看,OrgC、Se、N、Hg、P、S等元素(指标)表层是深层的1.58~2.97倍,且表深土壤中这些元素的相关系数均小于0.3,其成土过程和人类活动对上述元素自然成分的改造作用显著。济南市Pb、Zn、Cd、Cu等元素含量要明显低于长沙、成都、洛阳及香港等开发历史较长、经济较发达的城市,高于开发历史较短的深圳市,人类活动(主要为工业污染)历史长短及强度是影响城市土壤重金属累积程度的重要原因。

(2)地统计学的半方差模型分析表明,济南市区Cd、Hg、Se、Pb、Cu、As等元素的块金效应变大、变程减小,人类活动特别是工业布局对其表层土壤重金属含量有明显的影响;但对整个研究区而言,土壤元素含量总体仍主要受自然空间格局控制。受城市建设等人类活动影响,pH值和CaO呈现从济南市区外围向中心明显增加的碱化趋势。盛行风向对表层土壤重金属元素的分布可能叠加了影响,沿顺风向有漂移现象。

(3)济南市区、历城和章丘总体为轻度污染,局部存在岛状中度或重度污染区,污染元素主要为Hg、Cu、Cr、Cd,这些元素高含量区与污染源空间分布相吻合,而长清、济阳土壤环境质量好,总体达警

戒限级。各地区土壤综合环境质量从优到劣排序为: 济阳、长清、章丘、历城、济南市区。

**致谢:** 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

#### 参考文献(References):

- [1] Imperato M, Adamo P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124: 247–256.
- [2] 管后春, 李运怀, 彭苗枝, 等. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1949–1958.  
Guan Houchun, Li Chunhui, Peng Miaozi, et al. The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan City[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1949–1958(in Chinese with English abstract).
- [3] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学特征及污染评价[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1387–1396.  
Dai Jierui, Pang Xugui, Yu Chao, et al. The characteristics of geochemistry in soil and the evaluation of pollution in east area of Shandong Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1387–1395 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 土壤元素污染等级划分方法及其应用[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1631–1639.  
Cheng Guoguang, Liang Xiaohong, Zhou Guohua, et al. Grade division method for soil geochemical contamination and its application[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1631–1639 (in Chinese with English abstract).
- [5] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染来源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 40–48.  
Dai Jierui, Zhu Decheng, Pang Xugui, et al. Geochemical characteristics and pollution sources identification of the near-surface atmosphere dust-fall in Jining city[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 40–48 (in Chinese with English abstract).
- [6] 阎鹏, 徐世良, 曲克健, 等. 山东土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994, 231–232.  
Yan Peng, Xu Shiliang, Qu Kejian, et al. *Shandong Soil*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994, 231–232.
- [7] 鄢明才, 顾铁新, 迟清华, 等. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. *物探与化探*, 1997, 23(3): 161–167.  
Yan Mingcai, Gu Tiexin, Chi Qinghua, et al. Abundance of chemical elements of soils in China and supergenesis geochemistry characteristics [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1997, 21(3): 161–167(in Chinese with English abstract).
- [8] 陶澍, 曹军, 李本纲, 等. 深圳市土壤微量元素含量成因分析[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 248–255.  
Tao Shu, Cao Jun, Li Bengang, et al. Distribution pattern of trace elements in soil from Shenzhen area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 248–255 (in Chinese with English abstract).
- [9] 周涛, 息朝庄, 戴塔根, 等. 湖南长沙城市土壤地质环境综合评价[J]. *广东微量元素科学*, 2008, 15(6): 248–255.  
Zhou Tao, Xi Chaozhuang, Dai Tagen, et al. Comprehensive assessment of urban geological environment in Changsha city[J]. *Guangdong science of trace elements*, 2008, 15(6): 248–255 (in Chinese with English abstract).
- [10] 施泽明. 成都市生态环境地球化学评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.  
Shi Zeming. *Ecological Environmental Geochemical Evaluation of Chengdu City*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张春梅. 城市土壤重金属的污染和生态风险评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
Zhang Chunmei. *Soil Heavy Metals Pollution and Ecological Risk Assessment in the City*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [12] 鲁艳红. 太原市土壤重金属污染特征及盆地背景研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
Lu Yanhong. *Soil Heavy Metal Pollution Characteristics and Basin Background Research in Taiyuan*[D]. Changsha: Central South University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王仁铎. 地质统计学的发展趋势[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(2): 99–102.  
Wang Renduo. Developing tendencies of geostatistics[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1996, 15(2): 99–102(in Chinese with English abstract).
- [14] 鲍新华. 吉林-长春-四平城市经济带表土环境质量评价与生态地球化学分区[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
Bao Xinhua. *Study on Environmental Quality Assessment and Ecological Geochemistry Regionalization of Topsoil in Jilin-Changchun-Siping Urban Economic Zone* [D]. Changchun: Jilin University, 2011 (in Chinese with English abstract).