

# 土壤元素污染等级划分方法及其应用

陈国光<sup>1</sup> 梁晓红<sup>1</sup> 周国华<sup>2</sup> 张 明<sup>1</sup> 林才浩<sup>3</sup>

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016;2.中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊,065000;3.福建省地质调查研究院,福建福州 350013)

**摘要:**以土壤中有毒有害元素含量为依据,以元素污染叠加程度为准则,提出了土壤污染等级标准的确定方法。长江三角洲、福建沿海地区的试验研究表明,表、深层土壤成土母质具有同源性,元素含量具有较好的相关性,深层土壤基本不受人活动的影响,基于深层土壤元素含量确定的地球化学基准值是土壤污染等级划分的基础依据,据此建立了长江三角洲地区土壤污染等级标准,取得了该地区土壤污染等级划分结果。根据土壤污染成因及其生态环境意义,厘定了不同土壤污染等级的内涵。研究认为土壤污染等级区的生态效应需综合各种因素进行分析。

**关键词:**有毒有害元素;土壤污染等级;土壤元素地球化学基准值;生态地球化学效应;长江三角洲;福建沿海地区  
**中图分类号:**P66      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2011)06-1631-09

随着多目标区域地球化学调查在中国中、东部地区的全面推进以及在西部地区的不断扩展,积累了大量的表层和深层土壤中元素含量的高精度数据。根据区域地质背景、土壤类型和土地利用情况,经统计分析可取得土壤元素的地球化学基准值和背景值,进一步评价土壤污染程度、划分土壤污染等级,从而为土地利用规划和生态环境保护提供依据。本文以长江三角洲、福建沿海地区为研究区,以多目标区域地球化学调查数据为依据,探讨了土壤污染程度评价及其等级划分的思路与方案。

## 1 土壤污染的概念

环境污染是指人类活动所引起的环境质量下降而有害于人类或生物正常生存和发展的现象<sup>[1]</sup>。这一定义包含二层意思:(1)由人类活动引起的环境质量下降;(2)环境质量下降危及人类或生物生存和发展。显然,环境污染是一个从量变到质变的发展过程<sup>[2]</sup>,很

难确定污染物累积与危害发生的截然界线。土壤污染与环境污染一样,包含土壤环境质量的下降和危及人类或生物生存和发展,但为了研究的可操作性及可行性,本文将土壤污染定义为人类活动影响下土壤环境质量的下降,并综合考虑土壤环境质量的下降(即污染)程度和污染元素的生态危害临界值确定污染危害的界线。其实质就是以未受人活动影响的深层土壤元素含量(地球化学基准值)为参比,度量土壤环境的相对变化程度,综合考虑土壤污染的生态效应,确定土壤污染等级划分标准,划分土壤污染等级。

需要说明的是,环境生态学意义上的污染程度是指人为活动叠加到一定程度,产生生态环境危害影响的程度,多指已发生了的污染危害。本文中的土壤污染程度是以地球化学元素基准值为参比计算得到的数值,当较低时反映了人为污染叠加量较小,往往没有明显的污染危害效应;而当高于某一临界值

收稿日期:2011-03-06;改回日期:2011-09-06

基金项目:“全国土壤现状调查及污染防治”专项“长江三角洲地区多目标区域地球化学系列图编制”(GZTR20060202)和国土资源大调查项目“福建省沿海经济带生态地球化学调查”(1212010310307)资助。

作者简介:陈国光,男,1964年生,博士,教授级高工,现主要从事应用地球化学研究;E-mail:cgguoguang@cgs.cn。

时,其危害风险较高。

## 2 土壤污染的判别准则

大量研究表明:表层土壤既受到成土过程中表生地球化学作用的改造,又受到人类活动的影响;而深层土壤基本不受人为活动的影响,反映了原始成土母质的地球化学特征。因而表层和深层土壤地球化学特征既有成因联系,又有组成上的差异。多目标区域地球化学调查资料表明,表层和深层土壤地球化学特征虽有差异,但总体上仍有密切的联系。具体表现为:

### (1) 表层与深层土壤元素的同源性

从地质角度看,表层与深层土壤同属第四系松散物质,多数情况下物源、沉积环境相同,因此,除因水动力条件、风力条件、沉积环境变化而造成局部性的沉积物粒度、结构和组成差异外,其原始物质组成是相同或相近的。多目标区域地球化学调查资料表明,长江三角洲大多数沉积环境中表层土壤元素背景值与深层土壤地球化学基准值很接近。表生环境中活动性弱的 Zr 元素最为典型,除冲洪积、残积环境外,其他环境中表层土壤元素背景含量与深层土壤地球化学基准值十分接近(表 1)。其他表生活动性较弱或人类活动影响较小的元素和组分,包括 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ge、Li、Nb、Rb、Th、W 等,在表、深层土壤中含量也很接近。当然,表生活动性强或人为污染明显的元素,如 Hg、S、C、OrgC 等,在表、深层土壤

中含量存在较大的差异。

### (2) 表层与深层土壤元素含量相关性较好

求取长江三角洲每 16 km<sup>2</sup> 网格表层土壤元素算术平均值,再计算表层与深层土壤元素含量的相关系数,结果(表 2)显示:除 Au、Cd、Cu 等人为影响显著的元素相关性较差外,其他元素均表现为正相关。其中,常量组分 MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以及微量元素 Sr、U、Rb、Li、Zr、Ba、Nb、Ti、Ni、V 等的相关系数大于 0.4,达显著正相关水平。这说明表层和深层土壤元素的区域分布模式十分相似,成因来源基本相同。

### (3) 深层土壤元素基本不受人为活动的影响

早在多目标区域地球化学调查全面实施之前,中国地质调查局部署开展了“厚覆盖区地球化学调查和评价方法技术研究”、“区域环境地球化学调查方法研究”等项目,在珠江三角洲、南京、鄱阳湖周边、成都盆地、江汉平原等地,针对不同地质背景、地理景观、土地利用现状,研究了土壤剖面元素地球化学特征,结果发现人为活动(污染)影响的深度多在 100 cm 左右,个别可达 160 cm。综合考虑野外采样效率等因素,多目标区域地球化学调查深层土壤样品的采集深度确定为大于 150 cm。由此得到的深层土壤元素含量基本反映了原始沉积物质(成土母质)的化学组成,人为活动(污染)的影响可以忽略。

多数情况下表层土壤与深层土壤的沉积环境、

表 1 长江三角洲土壤 Zr 背景值、基准值(mg/kg)及其比值

Table 1 Geochemical background and baseline in different geological settings of the Yangtze River delta

	海积	泻湖积	冲海积	湖积	湖沼积	冲湖积	冲积	冲洪积	洪积	洪坡积	残积	残坡积	全区
背景值	241	248	278	246	257	255	311	333	306	327	303	365	282
基准值	243	254	253	247	255	267	282	282	332	319	300	279	276
比值	0.99	0.98	1.10	1.00	1.01	0.96	1.11	1.18	0.92	1.03	1.01	1.31	1.02

表 2 长江三角洲表层土壤与深层土壤中元素含量相关系数

Table 2 Correlation coefficients of element concentrations in top soils and bottom soils of the Yangtze River delta

元素	Ag	As	Au	B	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Cl	Co	Cr	Cu
相关系数	0.149	0.204	0.024	0.446	0.591	0.444	0.251	0.381	0.055	0.435	0.297	0.415	0.462	0.073
元素	F	Ga	Ge	Hg	I	La	Li	Mn	Mo	N	Nb	Ni	P	
相关系数	0.399	0.445	0.236	0.302	0.421	0.381	0.606	0.272	0.344	0.279	0.589	0.543	0.318	
元素	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Th	Ti	Tl	U	V	
相关系数	0.116	0.614	0.132	0.072	0.483	0.405	0.107	0.704	0.462	0.566	0.435	0.629	0.512	
元素	W	Y	Zn	Zr	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	C	OrgC	
相关系数	0.282	0.512	0.218	0.598	0.531	0.452	0.451	0.72	0.724	0.782	0.809	0.235	0.282	

注:样本数为 4553;置信度为 95%时相关系数临界值为 0.081。

成土母质基本相同,深层土壤元素含量特征可以作为表层土壤成土母质特征。因此,深层土壤元素含量可以作为判断表层土壤人为作用(污染叠加)程度的参比值,即地球化学基准值是判断表层土壤污染程度的依据。本文所述的土壤元素污染等级划分,即是相对于土壤元素地球化学基准值的表层土壤元素富集程度,以反映表层土壤相对于深层土壤的污染元素叠加量,同时考虑土壤污染级次所对应的生态效应所确定的土壤污染程度。

在具体制定土壤污染等级过程中,还应根据每种元素的迁移特征和研究区的自然地理环境等因素进行修正。

### 3 土壤元素污染分级标准

#### 3.1 标准的多层次性

中国幅员辽阔,自然地理、地球化学景观变化大,表生地球化学作用差异显著。为消除不同区域景观条件下成土过程中元素活化、迁移、重分配的差异性影响,有效地反映人类活动(污染叠加)的作用,拟建立由全国、大区域、省级、局部构成的多层次的土壤污染等级划分标准,以满足不同区域和工作精度评价的需要。

#### 3.2 污染等级的含义

土壤污染等级划分一方面要反映相对于原始物质组成的富集程度,即外来物质(污染)导致的元素含量增加程度;另一方面,要尽可能反映这种叠加作用与生态效应的联系。划分土壤污染等级的基本目标是:(1)等级划分结果应能反映土壤元素含量总体变化特征;(2)有利于判别污染的强度和污染类别,即反映工业污染、农业污染、矿山开采污染等人为活动污染特征;(3)土壤污染级次应遵循一定的规律,并尽可能简单、易操作;(4)等级划分有利于对土壤污染区评价、监测等研究工作的部署。

为达到上述目标,污染分级不能太少,分级太小时划分结果往往无法反映污染成因及作用特点;而实际工作中由于污染成因识别、生态效应判断的难度相当大,且很难有截然界线,因而污染级次又不宜过多。考虑这些因素,拟将土壤污染等级分为六级:清洁级、一级污染、二级污染、三级污染、四级污染、五级污染。各污染级次的含义为:

清洁级:土壤保持了原始沉积物(成土母质)的组成特征,没有明显的人为污染叠加。

一级污染:区域性因素或表生作用引起表层土壤元素含量增高,呈现地球化学元素区域性高背景分布,需研究分析其成因。

二级污染:工业生产、农业生产等局域性因素引起的表层土壤元素含量轻度增高,矿化作用外带、特殊地质体分布区土壤元素含量,地球化学元素分布呈现为弱异常带或弱异常区。需研究土壤元素含量变化趋势,综合评价区内生态效应。

三级污染:工业生产、矿山开采等引起局部地区表层土壤元素含量增高,矿化作用中带分布区土壤元素含量,地球化学元素分布呈现为异常带或异常区。需定时监测土壤元素含量变化,定时监控其生态效应。

四级污染:工业生产、矿山开采等引起局部地区表层土壤元素明显增高,矿化作用内带分布土壤元素含量,地球化学元素分布呈现为局部高异常区。需对土壤元素含量变化进行长期监控,评价土壤元素的生态效应、人居环境的安全性。

五级污染:工业生产、矿山开采等引起局部小区表层土壤元素显著增高,矿区内主要成矿元素含量,地球化学元素分布呈现为局部异常浓集中心区。若为农业用地,需进行土壤污染修复。若为建设用地,需评价并监测土壤污染对人居环境的影响。

#### 3.3 污染等级标准定值方法试验及其应用效果

清洁级土壤是指土壤地球化学组成特征处于自然背景状态,实际工作中以未受人类活动影响的深层土壤地球化学组成(地球化学基准值)作为清洁级土壤的判别标准,即以“地球化学基准值+2倍标准离差”作为清洁级的界限,反映的是深层土壤样品累积频率95%分位数相对应的元素含量值。以清洁级界限值的倍数或“地球化学基准值+n倍标准差”作为一级污染至五级污染的界限值,得到长江三角洲、福建沿海地区土壤污染等级标准试验值(表3~4)。

对比发现,以清洁级界限值的倍数作为一级污染至五级污染的界限值,方法简单、易操作。同时发现,采用上述土壤污染等级划分土壤污染程度,可以反映土壤污染的内部特征,且不同污染强度与变差系数间有一定的关系。鉴于土壤元素含量与生态效应关系的复杂性,一级污染至五级污染的界限值应根据生态效应作适当的修正。例如,对比发现按照方案4划分得到的长江三角洲、福建沿海地区Cd污染等级,能较好地反映如下特征:

表 3 长江三角洲土壤污染等级标准试验值  
Table 3 Soil contamination grade standards based on preliminary studies in the Yangtze River delta

元素	基准值	标准差	变异系数	清洁级	一级污染	二级污染	三级污染	四级污染	备注
Cd(方案 1)	0.0717	0.0376	0.525	0.15	0.22	0.3	0.37	0.45	按两倍标差递增
Cd(方案 2)				0.15	0.225	0.375	0.825	1.425	2、4、8、16 倍标准差
Cd(方案 3)				0.15	0.3	0.6	0.9	1.2	按两倍递增
Cd(方案 4)				0.15	0.225	0.375	0.525	1.05	按 1.5、2.5、3.5、7 倍递增
Hg(方案 1)	0.0572	0.0262	0.458	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32	按两倍标差递增
Hg(方案 2)				0.11	0.16	0.36	0.66	1.06	2、4、8、16 倍标准差
Hg(方案 3)				0.11	0.22	0.44	0.88	1.76	按两倍递增
Hg(方案 4)				0.11	0.33	0.66	0.99	1.98	3、6、9、18 倍
As(方案 1)	4.96	3.1	0.625	11	17	23	29	35	按两倍标差递增
As(方案 2)				11	22	44	66	88	按两倍递增
As(方案 3)				11	16.5	22	27.5	33	按 1.5、2.0、2.5、3 倍递增
Cu(方案 1)	11.9	6.5	0.546	25	44.5	70.5	103	142	3、4、5、6 倍标准差递增
Cu(方案 2)				25	38	77	142	233	2、6、10、14 倍标准差递增
Cu(方案 3)				25	50	100	150	200	按 1 倍递增
Cu(方案 4)				25	50	75	125	250	按 2、3、5、10 倍递增
Pb(方案 1)	42.26	15.32	0.363	73	104	134	165	196	按两倍标差递增
Pb(方案 2)				73	104	165	287	593	2、4、8、16 倍标准差
Pb(方案 3)				73	146	292	584	1168	按两倍递增
Pb(方案 4)				73	146	219	365	730	按 2、3、5、10 倍递增
Cr(方案 1)	24.93	17.23	0.691	59.4	93.8	128.3	162.8	197.2	按两倍标差递增
Cr(方案 2)				59.4	93.8	162.8	266.2	404	2、4、6、8 倍标准差
Cr(方案 3)				59.4	118.8	237.6	356.3	475.2	按两倍递增
Cr(方案 4)				59.4	118.8	178.2	237.6	297	按 2、3、4、5 倍递增
Zn(方案 1)	70.02	28.57	0.408	98.6	184.3	298.5	441.4	670	按两倍标差递增
Zn(方案 2)				98.6	197.2	394.4	593.9	788.8	按两倍递增
Zn(方案 3)				98.6	197.2	295.8	394.4	493	按 1 倍递增
Ni(方案 1)	11.45	6.3	0.55	24	37.6	50.2	62.6	85.2	按两倍标差递增
Ni(方案 2)				24	48	96	144	192	按两倍递增
Ni(方案 3)				24	48	72	96	120	按 1 倍递增

(1) 污染成因, 如长江三角洲沿江 Cd 污染达到二级, 局部的农业污染或次级河流引起的污染一般为一级污染, 城市或工业污染达到三级或四级污染。

(2) 城市内部结构, 远郊为一级污染、近郊为二级污染、市区为三级污染、老城区为四级以上土壤污染。如缩小福州市 Cd 一级污染与清洁级界限值的

间隔, 可以较好地地区域性含量增高与局部因素引起的元素含量增加。当福州市二级土壤污染界限值减小为基准值的 1.5 倍后, 土壤污染等级(图 1)的空间分布较好地反映出远郊、近郊、城乡结合部、城区、老城区的城市分区。

(3) 长江三角洲、福建沿海地区重要城市的污染

表 4 福建省沿海经济带土壤污染等级标准试验值  
Table 4 Soil contamination grade standards based on preliminary studies in the coastline areas of Fujian Province

元素	基准值	标准差	变异系数	清洁级	一级污染	二级污染	三级污染	四级污染	备注
Cd(方案 1)	0.0717	0.0376	0.525	0.15	0.22	0.3	0.37	0.45	按两倍标差递增
Cd(方案 2)				0.15	0.225	0.375	0.825	1.425	2、4、8、16 倍标准差
Cd(方案 3)				0.15	0.3	0.6	0.9	1.2	按两倍递增
Cd(方案 4)				0.15	0.225	0.375	0.525	1.05	按 1.5、2.5、3.5、7 倍递增
Hg(方案 1)	0.0572	0.0262	0.458	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32	按两倍标差递增
Hg(方案 2)				0.11	0.16	0.36	0.66	1.06	2、4、8、16 倍标准差
Hg(方案 3)				0.11	0.22	0.44	0.88	1.76	按两倍递增
Hg(方案 4)				0.11	0.33	0.66	0.99	1.98	3、6、9、18 倍
As(方案 1)	4.96	3.1	0.625	11	17	23	29	35	按两倍标差递增
As(方案 2)				11	22	44	66	88	按两倍递增
As(方案 3)				11	16.5	22	27.5	33	按 1.5、2.0、2.5、3 倍递增
Cu(方案 1)	11.9	6.5	0.546	25	44.5	70.5	103	142	3、4、5、6 倍标准差递增
Cu(方案 2)				25	38	77	142	233	2、6、10、14 倍标准差递增
Cu(方案 3)				25	50	100	150	200	按 1 倍递增
Cu(方案 4)				25	50	75	125	250	按 2、3、5、10 倍递增
Pb(方案 1)	42.26	15.32	0.363	73	104	134	165	196	按两倍标差递增
Pb(方案 2)				73	104	165	287	593	2、4、8、16 倍标准差
Pb(方案 3)				73	146	292	584	1168	按两倍递增
Pb(方案 4)				73	146	219	365	730	按 2、3、5、10 倍递增
Cr(方案 1)	24.93	17.23	0.691	59.4	93.8	128.3	162.8	197.2	按两倍标差递增
Cr(方案 2)				59.4	93.8	162.8	266.2	404	2、4、6、8 倍标准差
Cr(方案 3)				59.4	118.8	237.6	356.3	475.2	按两倍递增
Cr(方案 4)				59.4	118.8	178.2	237.6	297	按 2、3、4、5 倍递增
Zn(方案 1)	70.02	28.57	0.408	98.6	184.3	298.5	441.4	670	按两倍标差递增
Zn(方案 2)				98.6	197.2	394.4	593.9	788.8	按两倍递增
Zn(方案 3)				98.6	197.2	295.8	394.4	493	按 1 倍递增
Ni(方案 1)	11.45	6.3	0.55	24	37.6	50.2	62.6	85.2	按两倍标差递增
Ni(方案 2)				24	48	96	144	192	按两倍递增
Ni(方案 3)				24	48	72	96	120	按 1 倍递增

结构特征基本一致(图 1~2)。

## 4 应用实例:长江三角洲土壤污染等级划分

### 4.1 污染等级标准的定值方法

前节以长江三角洲、福建沿海地区为例,探讨了土壤污染等级标准的各种定值方法,给出了污染分级标准值,据此得到了两个试验区土壤污染等级划

分结果。对比土壤污染等级分区、分布结构特征与土壤元素区域分布、生态效应的空间关系,认为采用清洁级元素含量界限值的倍数作为各污染等级划分标准,所取得的评价结果最符合客观实际。通过研究确定的各污染等级界限值与清洁级土壤元素含量的倍数关系见表 5。

### 4.2 土壤污染等级标准

根据前述污染等级标准定义、定值方法,以及根

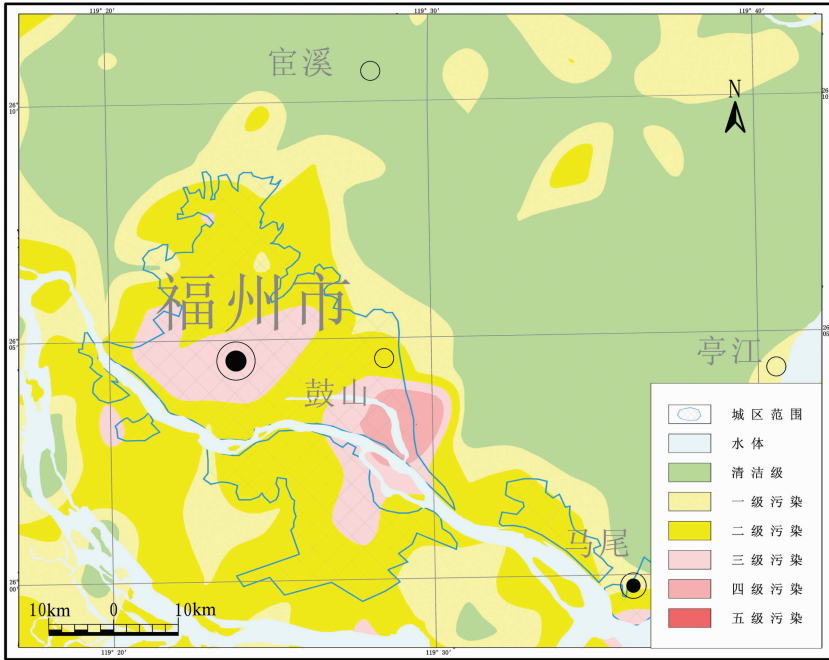


图 1 福建省福州市土壤 Cd 污染等级划分图

Fig.1 Contamination grade distribution of soil cadmium in Fuzhou, Fujian Province

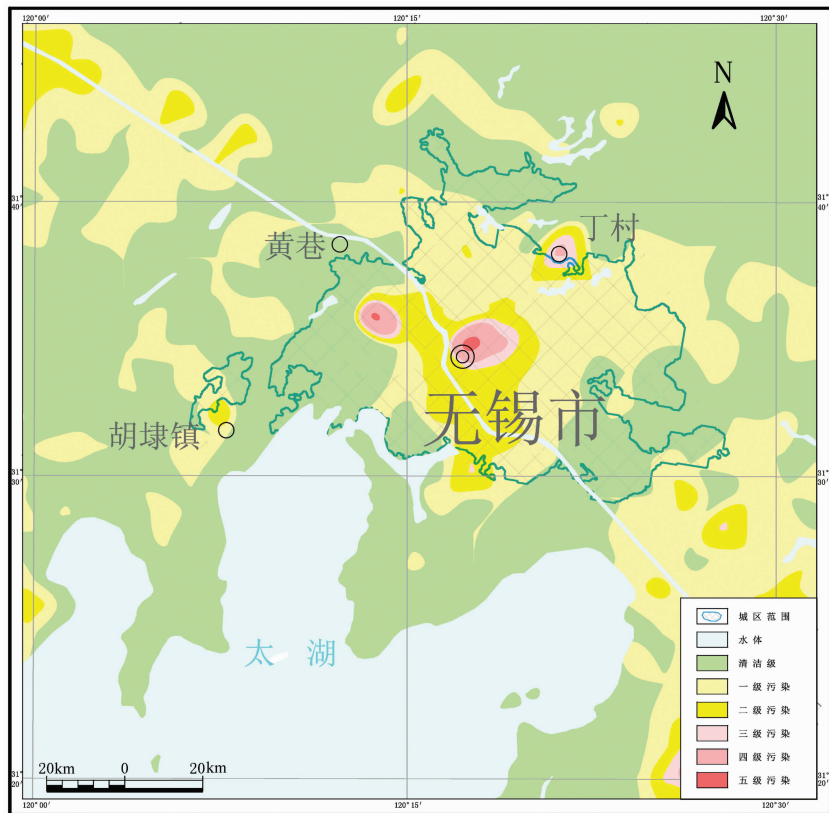


图 2 江苏省无锡市土壤 Cd 污染等级划分图

Fig.2 Contamination grade distribution of soil cadmium in Wuxi, Jiangsu Province

表 5 各级土壤污染标准与清洁级土壤元素含量界限值的倍数关系

Table 5 Relationship of soil contamination grade standards to clean soil values

元素	变异系数	清洁级	一级污染	二级污染	三级污染	四级污染
Cd	0.52	1	1.5	2.5	3.5	7
Hg	0.47	1	3	6	9	18
As	0.31	1	1.5	2	2.5	3
Cu	0.31	1	2	3	5	10
Pb	0.22	1	2	3	5	10
Cr	0.21	1	2	3	4	5
Zn	0.25	1	2	3	4	5
Ni	0.25	1	2	3	4	5
Sb	0.41	1	2	4	6	8
Be	0.16	1	1.5	2	2.5	3
Tl	0.18	1	1.5	2	2.5	3
Th	0.14	1	1.5	2	2.5	3
U	0.16	1	1.5	2	2.5	3
Ge	0.098	1	1.5	2	2.5	3
F	0.212	1	2	3	4	5
Sn	0.19	1	2	4	6	8
S	0.49	1	2	4	6	8

表 6 长江三角洲土壤污染等级标准

Table 6 Soil contamination grade standards in the Yangtze River delta

元素	清洁级	一级污染	二级污染	三级污染	四级污染	五级污染
As	15	22.5	30	37.5	40	>40
Be	3	4.5	6	7.5	9	>9
Cd	0.18	0.27	0.45	0.63	1.26	>1.26
Cr	101	152	202	253	303	>303
Cu	37	74	111	185	370	>370
F	732	1098	1464	1930	2196	>2196
Ge	1.7	2.55	3.4	4.25	5.1	>5.1
Hg	0.078	0.234	0.468	0.702	1.404	>1.404
Ni	46	92	138	184	230	>230
Pb	35	70	105	175	350	>350
Sb	1.11	3.3	6.6	9.9	13.2	>13.2
Sn	4.59	9.18	18.36	27.5	36.72	>36.72
Th	18	27	36	45	54	>54
Tl	0.93	1.39	1.86	2.32	2.79	>2.79
U	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2	>10.2
Zn	102	204	306	408	510	>510

据实际数据计算确定的长江三角洲土壤元素污染等级标准见表 6。

### 4.3 土壤污染等级划分结果

从长江三角洲土壤污染等级标准的划分结果(表 6)可以看出:区内 16 种土壤元素以 Sn、Hg 污染最为严重,存在大面积的二级以上污染;而 As、Be、Cr、F、Ge、Ni、Th 等元素土壤污染面积较小,以清洁级为主。8 个典型重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Ni、Zn 综合土壤污染等级评价显示,区内清洁级面积仅占 15.79%,一、二级污染区分别占总面积的 52.57%、25.63%,表明区域性面状轻污染广泛分布,反映了长江三角洲普遍受到了人类活动影响这一实际情况。区内三级及以上污染区面积占 5.87%,面积达 4 490 km<sup>2</sup>,表明存在一定面积的局部污染,实施土壤地球化学监测、评估农产品和人居环境安全十分紧迫。长江三角洲土壤污染等级较高的地区主要有:

(1)沿江二级污染土壤分布带。沿长江两岸分布,以 Cd、Ni、Cu、F、Hg、Pb、Sb、Zn 等元素污染为主,分布面积大、污染程度不高、含量分布较均匀。

(2)城市三级以上污染土壤分布区。以 Hg、Cd、Pb、Sb、Sn、Zn、Cu 等元素污染为主,主要分布在扬州、南京、常州、无锡、苏州、上海、杭州、绍兴、宁波等城市及周边地区,其中扬州、苏州、上海、杭州、绍兴、宁波等城市及周边地区存在较大面积的四级以上土壤污染。

(3)苏州通安镇—常熟市、昆山蓬朗镇—常熟支塘镇存在 2 个三级以上土壤污染带。主要污染元素有 Hg、Cd、Pb、Sb、Sn、Zn、Cu、U,其中 Hg、Cd、Pb、Sn 存在三级以上土壤污染。

(4)苏—锡—常、上海、杭嘉湖、宁—绍等长江三角洲核心地区普遍存在一级、二级污染,局部地区有三级以上污染。

典型重金属元素 Hg 的土壤污染等级分布为:二级以上土壤污染面积达 14%以上,主要分布在宁绍—杭嘉湖—上海—无锡—苏州—常州—镇江—南京—扬州等工业发达、人口密集地区;三级以上污染区主要位于南京、扬州、苏州、绍兴、宁波等历史悠久的城市区,其中,城市中心存在四级以上 Hg 污染土壤。

典型重金属元素 Cd 的土壤污染等级分布为:二级以上土壤污染面积达 8%以上,宁镇、宁粟地区的二级污染区主要与矿化有关,沿江镉污染带与长

江冲积物堆积有关,其他 Cd 污染区则主要与城市 and 局部工业污染有关。区内存在 470 余平方千米的四级以上土壤污染,除上海等城市镉污染区外,其他都分布于城郊或农业区,应该评价这类污染区的生态效应,进行土壤污染监测。

### 4.4 土壤污染等级划分意义

#### (1)污染级次反映污染成因

局部农业污染或次级河流引起的污染多为一级污染;沿江自然沉积作用引起的镉污染为二级污染;城市或工业污染达到三级甚至四级污染。

在宁波—台州与花岗岩、酸性火山岩风化有关的残积、冲洪积土壤中,存在 Tl、U 等一、二级污染。

#### (2)污染元素组合反映污染成因

长江三角洲土壤污染等级划分结果表明,土壤 As、Be、Cr、F、Ge、Ni、Th 等污染较弱,基本处于清洁级。土壤 Hg、Sn 污染相对较强,Sn 可能是人类活动影响最强烈的元素之一,其成果为区内环境保护和治理提供了重要依据。

不同的元素污染具有自身的规律。如土壤 Pb、Hg 二级及三级以上污染区分布都与城区、工业区有明显的关系,三级以上污染土壤反映不同的分布状况,历史悠久的南京、杭州、苏州、绍兴、宁波等城市三级以上 Hg 污染比例较高、面积较大,工业发达的上海存在面积较大的三级以上 Pb 污染。

#### (3)污染分带结构反映污染发展历史

长江沿江的 Cd 土壤污染等级,较好地反映了沿江镉污染的内部结构。南京—镇江段与镇江—南通段自上而下变化的差异,前者以二级以上污染为主,后者则以一级污染土壤为主。另一方面,土壤污染等级划分也反映了距离长江的 Cd 污染变化特征,沿江近岸区域为二级污染,远离长江过渡为一级污染和清洁级。

在城市区,土壤污染等级划分常反映出远郊为一级污染、近郊为二级污染、市区为三级污染、市区中心地带为四级以上污染。如上海市土壤 Pb 污染等级的变化。

#### (4)城市污染强度反映城市发展历史

8 个典型重金属元素的综合污染等级显示,上海、南京、杭州城市区土壤污染强度排序为:上海>杭州>南京,苏、锡、常城市区土壤污染强度排序为:苏州>无锡>常州。

长江三角洲土壤污染等级分区及其成因剖析,



为土壤污染防治、土壤环境及其生态风险监测体系的建议提供了重要依据。

## 5 结论与建议

长江三角洲、福建沿海地区试验表明,从土壤污染内涵出发,采取本文所述的土壤污染等级划分准则、标准定值方法,所取得的土壤污染等级划分结果能有效地反映叠加于自然背景之上的人为污染作用强度,识别污染成因类型,从而为污染防治、生态评价和监测提供重要依据。本研究建立的土壤污染等级划分理论与方法体系,对于中国其他地区土壤污染程度评价具有一定的借鉴意义。

当然,由于土壤系统的复杂性,土壤污染评价及其分级无论在理论上还是方法体系上还不成熟,有待进一步探索研究。

### 参考文献(References):

[1] 中国大百科全书环境科学编辑委员会. 环境科学卷[M]. 北京:中

国大百科全书出版社, 1983:203.

The Compilation Committee on Environmental Science of the Encyclopedia of China. Environmental Science [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1983:203(in Chinese).

[2] 夏家淇, 骆永明. 关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 87-90.

Xia Jiaqi, Luo Yongming. Definition and three evaluation guidelines of soil contamination[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1):87-90(in Chinese with English abstract).

[3] 陈国光, 奚小环, 梁晓红, 等. 长江三角洲地区土壤地球化学基准值及其应用探讨[J]. 现代地质, 2008, 22(6):1041-1049.

Chen Guoguang, Xi Xiaohuan, Liang Xiaohong, et al. Soil geochemical baselines of the Yangtze River delta and their significances [J]. Geoscience, 2008, 22 (6):1041-1049 (in Chinese with English abstract).

[4] 奚小环. 土壤污染地球化学标准及等级划分问题讨论 [J]. 物探与化探, 2006, 30(6):471-474.

Xi Xiaohuan. A discussion on the geochemical standard and grade division of soil pollution [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30 (6):471-474 (in Chinese with English abstract).

## Grade division method for soil geochemical contamination and its application

CHEN Guo-guang<sup>1</sup>, LIANG Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHOU Guo-hua<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, LIN Cai-hao<sup>3</sup>

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, Hebei, China; 3. Fujian Institute of Geological Survey and Research, Fuzhou 350013, Fujian, China)

**Abstract:** Grade division method for soil geochemical contamination has been established on the basis of the concentration and accumulation grade caused by human exploitation of toxic elements. A preliminary study in the Yangtze River delta and the coastal region of Fijian Province shows that the sediments or parent materials of deep and top soils are of homo-genesis and their element concentrations have good correlation. Geochemical baseline based on deep soil geochemical data can undoubtedly be selected as the reference value to assess soil contamination because deep soil has not been affected by human activity and pollution. Soil geochemical contamination grade standard of the Yangtze River delta was thus set up, and soil contamination of the region was divided according to the standard. The origin and eco-geochemical effect of each contamination grade are discussed in this paper. However, the eco-geochemical effects of soils of different contamination grades need further investigation.

**Key words:** harmful or toxic elements; soil geochemical contamination grade; soil geochemical baseline; eco-geochemical effect; Yangtze River delta; coastal region of Fijian Province

**About the first author:** CHEN Guo-guang, male, born in 1964, doctor, senior engineer, engages mainly in the study of applied geochemistry; E-mail: cguoguang@cgs.cn.