

# 应用标准化方法评价攀枝花地区表层土壤的重金属污染\*

滕彦国<sup>1</sup> 倪师军<sup>2</sup> 庾先国<sup>2,3</sup> 张成江<sup>2</sup>

(1 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875) (2 成都理工大学, 成都 610059)

(3 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要** 应用标准化方法建立了攀枝花地区土壤环境地球化学基线模型, 在此基础上, 评价了表层土壤的重金属污染状况。结果表明: 该区 Cd 没有污染, Co、Cr、Ni、Pb 为轻微污染, As、Zn 以轻微污染到中度污染为主, 污染程度较高的地区主要分布在工矿区。

**关键词** 标准化方法, 环境污染评价, 重金属, 表层污染, 攀枝花地区

**中图分类号** X53, P618

标准化方法是地球化学研究中的常用方法, 该方法的基本思想是将地球化学过程中的惰性元素作为标准, 用活性元素与惰性元素的相关性来判断活性元素的富集情况, 并根据活性元素与惰性元素的相关性, 建立两者之间的线性回归方程, 即基线模型<sup>[1,2]</sup>:

$$C_m = aC_N + b \quad (1)$$

其中,  $C_m$  表示样品中活性元素(污染元素)的测量浓度,  $C_N$  表示样品中惰性元素(标准元素)的测量浓度,  $a, b$  为回归常数。根据确定的  $a, b$  值可以计算  $C_m$  的预测值  $C_m$ , 并将其作为该元素的基线值。

采用标准化方法确定环境基线是进行环境污染评价的基础, 选择合适的评价因子是了解环境污染状况的重要保证。富集因子(EF)反映的是人类活动对自然环境扰动程度的重要指标, 其基本意义是将样品中元素的浓度与基线中元素的浓度进行对比, 以此来判断表生环境中元素的人为污染状况。为了减小环境介质、采样制样过程等因素对元素浓度的影响, 富集因子的计算常引入参比元素进行标准化。富集因子(EF)的计算公式可表示为<sup>[3,4]</sup>:

$$EF = \left[ \frac{(C_m / C_N)_{sample}}{(C_m / C_N)_{baseline}} \right] \quad (2)$$

$C_m$  ——元素 m 的浓度;

$C_N$  ——标准化元素的浓度。

表 1 富集因子分级表<sup>[6]</sup>

Table 1 Class of enrichment factor

EF	级别	污染程度
	Class	Contamination level
< 1	0	无污染
1~ 2	1	轻微污染(扰动)
2~ 5	2	中度污染(扰动)
5~ 20	3	显著污染
20~ 40	4	强烈污染
> 40	5	极强污染

当土壤中的富集因子显著大于 1 时, 表示该元素有外来污染; 当富集因子小于 1, 表示该元素被淋溶; 当富集因子近似等于 1 时, 表示该元素未被污染也未被淋溶<sup>[5]</sup>。根据富集因子的大小, 可以将元素的富集(污染)程度分为六个级别<sup>[6]</sup>(表 1)。

## 1 采样及分析结果

攀枝花地区的土地利用情况主要可分为四种: (1) 城市用地; (2) 工业用地; (3) 农业用地; (4) 未利用及规划中的土地。

2000 年 7~ 8 月, 在攀枝花地区系统采集了上述不同土地利用类型的土壤样品。为了尽量降低不同成土母质对土壤中化学元素

\* 中国博士后科学基金、教育部跨世纪优秀人才基金、四川省青年科技基金资助

- 通讯作者 E-mail: teng1974@163.com

收稿日期: 2001- 08- 21; 收到修改稿日期: 2002- 04- 08

含量的影响,研究中所采集的土壤样品系该区昔格达组地层风化形成的砂壤土和粉砂土,采样深度约为5cm。由于昔格达组风化形成的土壤在攀枝花地区分布广泛,背景均一,选择该类土壤作为研究对象,具有一定的代表性,便于研究该区土壤重金属污染特征,同时增强了不同工矿活动区土壤重金属污染的对比性。样品中As、Cd、Co、Cr、Cu、Pb、Zn等元素采用ICM-MS方法测试,样品在中国科学院地球化学研究所资源环境分析测试中心完成,分析结果见表2。

表2 土壤样品中的元素浓度

Table 2 Concentration of selected elements in soil (mg kg<sup>-1</sup>)

样品编号 Sample No.	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sc
PZH1A	12.94	0.26	18.24	97.82	49.05	52.03	37.50	85.60	10.98
PZH2A	12.94	0.18	16.10	96.82	41.12	57.16	25.94	72.09	11.24
PZH3A	10.76	0.39	18.72	101.30	40.73	55.64	28.46	81.66	11.31
PZH4A	16.53	0.28	19.44	107.60	49.96	66.40	37.42	85.92	13.09
PZH5A	5.41	0.14	10.79	50.12	20.96	30.61	20.20	48.27	7.09
PZH6A	8.74	0.26	13.58	81.95	30.86	38.63	29.79	109.30	9.46
PZH7A	14.85	0.35	17.52	93.82	40.08	55.71	33.39	89.91	11.42
PZH8A	10.26	0.17	12.26	71.41	24.88	37.76	22.60	56.19	8.55
PZH9A	13.36	0.20	13.18	71.64	27.79	39.44	27.55	67.80	8.10
PZH10A	11.58	0.21	15.57	86.32	33.24	48.72	28.61	72.80	9.61
PZH11A	9.85	0.19	17.34	91.35	37.30	49.41	33.22	81.42	10.64
PZH12A	6.89	0.07	10.33	57.19	20.92	30.24	22.01	48.44	6.93
PZH13A	7.07	0.12	11.10	59.90	23.98	33.44	22.46	53.21	7.47
PZH14A	7.55	0.11	11.34	66.36	21.74	34.15	25.44	57.92	7.57
PZH15A	48.26	0.18	11.55	73.68	29.19	38.31	27.18	64.56	8.93
PZH16A	7.70	0.20	12.87	75.84	25.17	39.21	26.96	69.14	8.02
PZH17A	10.33	0.19	14.68	80.08	31.74	43.72	26.30	72.06	9.59
PZH18A	9.55	0.19	13.79	78.85	34.83	41.13	29.63	69.19	8.36
PZH19A	11.72	0.20	14.02	83.40	29.83	41.86	25.49	75.59	9.01
PZH20A	12.32	0.21	19.84	108.40	45.39	61.76	26.71	87.82	11.21
PZH21A	13.48	0.15	17.13	87.11	35.36	52.02	29.97	81.63	10.92
PZH22A	14.04	1.01	10.92	59.01	22.41	31.96	22.64	57.73	7.78
PZH23A	12.35	0.32	16.85	83.47	39.91	48.14	32.28	119.60	8.86
PZH24A	13.04	0.38	18.61	95.22	42.92	54.72	37.96	166.20	10.92
PZH25A	14.64	0.29	16.15	81.04	41.46	48.77	43.61	106.10	9.65
PZH26A	16.85	0.33	18.50	103.60	47.23	58.23	41.65	105.00	12.54
PZH27A	16.00	0.24	14.66	79.18	34.44	38.82	28.72	70.94	8.79
PZH28A	9.46	0.27	13.68	72.56	34.68	44.67	28.53	68.11	7.81
PZH29A	24.40	0.34	16.48	84.83	39.93	50.72	33.70	83.66	8.99
PZH30A	10.95	0.27	14.69	77.45	39.98	45.24	28.18	71.73	8.58
PZH31A	12.94	0.14	11.99	72.45	32.14	38.84	24.70	64.94	8.55

注: PZH1A 为攀钢矿山, PZH4A 为攀钢尾矿坝, PZH7A 为岔河砖厂, PZH8A 为金江造船厂, PZH24A、PZH25A 为宝顶煤矿, PZH26A 为太平煤矿, PZH27A 为模梭河煤矸石场, PZH29A 为石灰石厂, PZH30A 为热电厂, PZH31A 为攀钢冶炼厂

## 2 基线模型的建立

### 2.1 标准化元素的选择

标准化程序的核心问题之一就是标准因子(元素)的选择。选择标准元素的原则还要根据研究区的地质特征和人类开发状况以及环境特点(污染类型)来进行,因此,对研究区基本的地质调查和环境调查是必要的。Al 是组成铝硅酸盐矿物最重要的组分之一,因此常被用于代表粒度变化的标准<sup>[7-10]</sup>。而在研究结晶岩冰蚀沉积物金属元素含量的标准化选用 Li 较 Al 好,对于非结晶岩而言,选用 Li 标准等于或略好于 Al 标准。在人类活动引起的金属输入量较自然来源低时,用 Fe 作为标准也是可以的<sup>[11-13]</sup>,在评价 Cr 的人为污染时可采用 Yb 作为标准化元素<sup>[14]</sup>。其它元素,如 Cs、Eu、Rb、Sc、Sm 和 Th 等元素也可以作为标准化因子(元素)。

由于攀枝花地区除农业生产以外,对环境扰动最大的是该区以煤炭开采加工、钒钛磁铁矿的采选冶以及其它非金属矿(石灰石、白云石等)开发等为主的矿业活动,因此,标准化元素的选择将首先排除与该区矿业活动密切相关的元素如 Fe、V、Ti、Ca、Mg、Si 等;另外,本项研究主要是确定重金属的污染情况,因此重金属如 Cr、Co、Ni、Hg、Cu、Pb、Zn 等元素也被排除在外。

表 3 表层土壤基线模型及有关参数

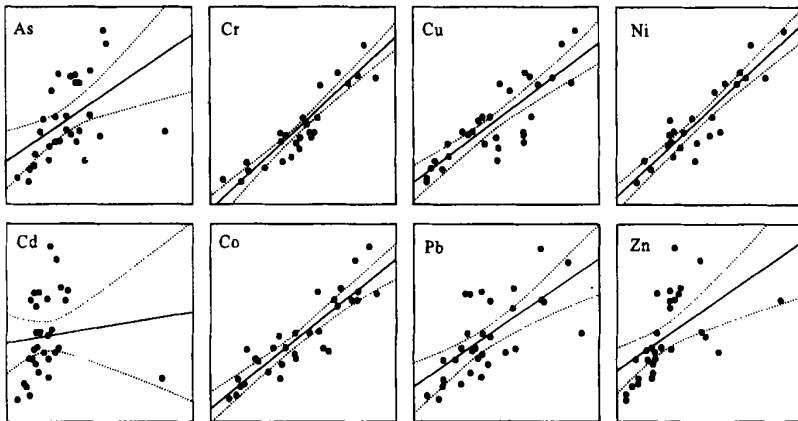
Table 3 Baseline model and relative parameters

基线模型 Baseline model	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significant
As = 0.907 Sc + 4.550	0.194*	0.05
Cd = 0.011 Sc + 0.152	0.105*	0.05
Co = 1.595 Sc - 0.166	0.893*	0.05
Cr = 8.621 Sc + 0.167	0.933*	0.05
Cu = 4.445 Sc - 7.520	0.840*	0.05
Ni = 5.482 Sc - 6.384	0.921*	0.05
Pb = 2.400 Sc + 6.644	0.668*	0.05
Zn = 8.272 Sc + 0.717	0.556*	0.05

通常用 Al 作为标准化因子,但在表生带中, Sc 的地球化学活动性较 Al 要弱<sup>[15]</sup>,因此,从地球化学行为特点上看,选择 Sc 作为标准化元素是可行的。国内在进行土壤背景值研究时,曾使用该元素作为参比元素(标准元素)检验得到土壤背景值的可靠性<sup>[16]</sup>。攀枝花地区表层土壤中 Sc 与重金属元素的相关性见图 1,相关系数见表 3,可见,Sc 与 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等元素的相关性较好,因此,在该区选择 Sc 作为标准化元素是可行的。

### 2.2 基线模型的建立

通过上述相关分析,以 Sc 作为标准化元素,利用(1)式得到的各重金属元素的基线模型见表 3。



各图中三条线分别表示 95% 置信边界线和拟合直线

图 1 表层土壤中重金属元素与 Sc 的相关关系

Fig. 1 Relationship between heavy metal and Sc in top soil

## 3 污染状况评价

利用基线模型及(2)式,计算得到的攀枝花地区表层土壤的富集因子(EF)和污染级别,见表4。

表4 攀枝花地区表层土壤的富集因子及污染级别

Table 4 Enrichment factor and class in topsoil in Panzhuha region

样品样号 Sample No.	As		Cd		Co		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	级别		级别		级别		级别		级别		级别		级别		级别	
	EF	Class	EF	Class	EF	Class	EF	Class	EF	Class	EF	Class	EF	Class	EF	Class
PZH1A	0.94	0	0.63	0	1.14	1	1.08	1	1.35	1	1.03	1	1.17	1	1.04	1
PZH2A	0.92	0	0.43	0	0.98	0	1.05	1	1.11	1	1.11	1	0.79	0	0.85	0
PZH3A	0.76	0	0.93	0	1.13	1	1.09	1	1.09	1	1.07	1	0.86	0	0.96	0
PZH4A	1.01	1	0.56	0	1.02	1	1.00	1	1.16	1	1.11	1	0.98	0	0.87	0
PZH5A	0.61	0	0.54	0	1.04	1	0.86	0	0.89	0	0.94	0	0.98	0	0.90	0
PZH6A	0.74	0	0.75	0	0.98	0	1.05	1	0.99	0	0.89	0	1.08	1	1.53	1
PZH7A	1.04	1	0.81	0	1.05	1	1.00	1	1.06	1	1.07	1	1.00	1	1.05	1
PZH8A	0.96	0	0.52	0	0.98	0	1.02	1	0.88	0	0.96	0	0.91	0	0.87	0
PZH9A	1.18	1	0.59	0	1.00	1	0.97	0	0.94	0	0.96	0	1.05	1	1.00	1
PZH10A	0.96	0	0.59	0	1.11	1	1.09	1	1.05	1	1.11	1	1.02	1	1.01	1
PZH11A	0.74	0	0.47	0	1.12	1	1.04	1	1.06	1	1.01	1	1.07	1	1.02	1
PZH12A	0.79	0	0.26	0	1.02	1	1.00	1	0.91	0	0.95	0	1.09	1	0.93	0
PZH13A	0.76	0	0.44	0	1.02	1	0.98	0	0.97	0	0.98	0	1.03	1	0.95	0
PZH14A	0.80	0	0.37	0	1.03	1	1.07	1	0.87	0	0.99	0	1.15	1	1.02	1
PZH15A	4.31	2	0.54	0	0.89	0	1.00	1	0.99	0	0.94	0	1.04	1	0.96	0
PZH16A	0.77	0	0.68	0	1.10	1	1.15	1	0.95	0	1.07	1	1.15	1	1.14	1
PZH17A	0.86	0	0.52	0	1.05	1	1.02	1	1.00	1	1.00	1	0.94	0	1.00	1
PZH18A	0.91	0	0.60	0	1.13	1	1.15	1	1.26	1	1.07	1	1.22	1	1.10	1
PZH19A	1.04	1	0.60	0	1.06	1	1.13	1	1.00	1	1.01	1	0.97	0	1.11	1
PZH20A	0.88	0	0.50	0	1.21	1	1.18	1	1.23	1	1.20	1	0.82	0	1.04	1
PZH21A	0.98	0	0.37	0	1.07	1	0.97	0	0.98	0	1.04	1	0.94	0	0.99	0
PZH22A	1.44	1	3.45	2	0.96	0	0.92	0	0.87	0	0.90	0	1.00	1	0.99	0
PZH23A	1.11	1	0.96	0	1.30	1	1.15	1	1.36	1	1.19	1	1.25	1	1.79	1
PZH24A	0.95	0	0.92	0	1.17	1	1.06	1	1.19	1	1.09	1	1.19	1	2.02	2
PZH25A	1.21	1	0.79	0	1.15	1	1.02	1	1.30	1	1.10	1	1.55	1	1.46	1
PZH26A	1.07	1	0.69	0	1.01	1	1.01	1	1.14	1	1.01	1	1.14	1	1.11	1
PZH27A	1.45	1	0.74	0	1.14	1	1.10	1	1.19	1	0.96	0	1.12	1	1.07	1
PZH28A	0.97	0	0.91	0	1.20	1	1.13	1	1.34	1	1.25	1	1.25	1	1.16	1
PZH29A	2.16	2	1.00	1	1.25	1	1.15	1	1.34	1	1.23	1	1.28	1	1.24	1
PZH30A	1.02	1	0.84	0	1.17	1	1.10	1	1.41	1	1.15	1	1.13	1	1.11	1
PZH31A	1.21	1	0.45	0	0.96	0	1.03	1	1.14	1	0.99	0	0.99	0	1.01	1

注: PZH1A 为攀钢矿山, PZH4A 为攀钢尾矿坝, PZH7A 为岔河砖厂, PZH8A 为金江造船厂, PZH24A、PZH25A 为宝顶煤矿, PZH26A 为太平煤矿, PZH27A 为模梭河煤矸石场, PZH29A 为石灰石厂, PZH30A 为热电厂, PZH31A 为攀钢冶炼厂

在研究重金属的污染程度及级别时,是根据计算得到的富集因子(EF)的大小来确定,因此,富集因子代表的是该元素在特定地点的扰动程度。攀枝花地区表层土壤中Cd的污染级别为0级,即属无污染;Co、Cr、Ni、Pb的污染级别以1级为主,表明土壤受到了轻微扰动;As、Zn以1级污染为主,表明土壤受到了轻微扰动,部分地区出现2级污染,即中度污染,表明土壤受扰动的程度较大。从土壤扰动的分布区域看,主要工矿区的富集因子略高,受扰动严重。

值得注意的是,土壤中重金属元素的富集因子揭示的只是土壤重金属的扰动状况,而不能完全代表污染特征和状态,因此,在研究这些元素在土壤中的污染特征时,应结合元素的环境地球化学和生物地球化学行为进行综合研究,确保获得的土壤污染信息全面可靠。

#### 4 结 论

以Sc作为标准化元素,采用标准化方法分别建立了攀枝花地区表层土壤中重金属元素As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn的环境地球化学基线模型。

以环境地球化学基线模型为基础,应用富集因子分析方法评价了该区表层土壤的重金属污染状况。结果表明: Cd没有污染(扰动); Co、Cr、Ni、Pb为轻微污染(扰动); As、Zn以轻微污染(扰动)为主,部分地区出现中度污染(扰动); 污染程度较高的地区主要分布在工矿区。

#### 参考文献

1. Colizza E, Fontolan G, Brambati A. Impact of a coastal disposal site for inert wastes on the physical marine environment, Barcola-Bovedo, Trieste, Italy. *Environmental Geology*, 1996, 27(4): 270~285
2. Covelli S, Fontolan G. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines. *Environmental Geology*, 1997, 30(1/2): 34~45
3. Forstner U, Wittmann G T W. *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1981. 486
4. Li Y H. Geochemical cycles of elements and human perturbation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1981, 45(9): 2073~2084
5. 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法. 北京: 气象出版社, 1987. 92~94
6. Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611~627
7. Windom H L, Schropp S J, Calder F D, *et al.* Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States. *Environ. Sci. Technol.*, 1989, 23(4): 314~320
8. Buland K W, Bertine K, Koide M, *et al.* History of metal pollution in Southern California coastal zone. *Environ. Sci. Technol.*, 1974, 8(5): 425~432
9. Hirst D M. The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria- II. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1962, 26(5): 1147~1187
10. Din T B. Use of aluminium to normalize heavy-metal data from estuarine and coastal sediments of Straits of Melaka. *Mar. Pollut. Bull.*, 1992, 24(4): 484~491
11. Trefry J H, Presley B J. Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the northwest Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 1976, 1(4): 282~294
12. Sinex S A, Wright D A. Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Mar. Pollut. Bull.*, 1981, 19(5): 425~431
13. Rule J P. Assessment of trace element geochemistry of Hampton Roads Harbor and lower Chesapeake Bay area sediments. *Environ. Geol. Water Sci.*, 1986, 8(3): 209~219
14. Prokisch J, Kovacs B, Palencsav A J, *et al.* Yttrium Normalization: A new tool for detection of chromium contamination in soil samples. *Environmental Geochemistry and Health*, 2000, 22(4): 317~323
15. 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984. 187~193
16. 中国科学院土壤背景值协作组. 中国土壤背景值研究. *土壤学报*, 1980, 16(4): 319~328

## APPLICATION OF A NORMALIZATION PROCEDURE IN ASSESSING HEAVY METAL POLLUTION IN TOPSOIL, PANZHIHUA REGION

Teng Yan-guo<sup>1</sup> Ni Shi-jun<sup>2</sup> Tuo Xian-guo<sup>2,3</sup> Zhang Cheng-jiang<sup>2</sup>

(1 *Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2 *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 3 *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

### Summary

The model of soil environmental geochemical baseline was built by application a normalization procedure. Based on the baseline model and the normalization procedure, the authors assessed heavy metal pollution in Panzhihua region. The results showed heavy metal pollution in Panzhihua region characterized as follow: a. Cd was uncontaminated; b. Co, Cr, Ni, Pb were slightly contaminated; c. As and Zn were slightly to moderately contaminated; d. heavy metal pollution mainly distributed in industrial and mining area.

**Key words** Normalization procedure, Environmental pollution assessment, Heavy metal, Topsoil, Panzhihua Region