

# 黄土高原黄土的平均化学成分 与地壳克拉克值的类比\*

文启忠 刁桂仪 潘景瑜

(中国科学院广州地球化学研究所, 510640)

吴明清

(中国科学院贵阳地球化学研究所)

## 摘 要

笔者对黄土高原的马兰黄土进行了系统地采样, 共采集样品 147 块(最后组合成 100 块样品进行分析), 对每个样品都分析了 54 种元素, 并用质量加权法计算了黄土各元素的丰度值。结果表明, 黄土高原各地黄土的化学成分彼此十分类似, 具有良好的均匀性特征。并且, 黄土的平均化学成分十分接近现在使用的地壳克拉克值。因此, 笔者认为, 可以用黄土的平均化学成分来代表大陆上部地壳的平均化学组成。从理论上说, 风成黄土的物源区很大, 又是天然高度均匀混合, 因而比前人的方法更合理, 更具有代表性, 更接近上部陆壳的真实情况。并且认为, 这是研究地壳克拉克值的一条新途径, 也是今后研究黄土地球化学的一个新的方向。

**关键词** 黄土的化学成分, 地壳克拉克值, 黄土高原

计算黄土高原黄土中化学元素的丰度(黄土层中元素的相对平均含量)是第四纪地球化学的基本研究内容之一。近 30 年来, 笔者对黄土高原黄土地球化学进行的大量研究表明, 各地黄土(尤其是马兰黄土)的化学成分基本上是相似的。黄土中无论是主要元素、微量元素还是稀土元素的含量在区域上的变化都不大。并且黄土的化学成分十分类似或接近大陆上部地壳的克拉克值。因而使笔者产生了可以用黄土的平均化学成分来代表大陆上部地壳克拉克值的新思想<sup>[1]</sup>。为验证此想法, 笔者特开展了本课题的研究。

本文在以往工作的基础上, 进一步对中国的马兰黄土进行系统地采样分析, 以质量加权法计算黄土的平均化学成分, 并与前人计算得的地壳克拉克值进行对比。

## 1 地质背景和样品采集

### 1.1 地质背景

\* 本文系国家自然科学基金资助项目。工作中得到刘东生、黎彤教授的关怀和指导; 耿安松、余素华、陈文华、雷剑泉等给予了热情支持和帮助, 谨致谢忱。

收到修改稿日期: 1994-09-22

黄土高原地区的马兰黄土堆积于不同类型古地面上,超覆于较老的黄土堆积物之上,连续覆盖面积约 259740km<sup>2</sup>,占黄河中游地区总面积的 40%以上,成为黄河中游自然景观的主体。在平面分布上自北而南,戈壁、沙漠、黄土呈带状排列<sup>[2]</sup>。

黄土高原马兰黄土的厚度自北而南由厚变薄。从北部的沙黄土到南部的粘黄土带,平均厚度的变化由 16m→9m→5m。整个黄土高原地区马兰黄土的平均厚度约为 10m。

据年代学研究<sup>[3]</sup>,马兰黄土属于晚更新世,是在氧同位素的 2、3 和 4 阶段堆积的。其中相当于第 2 阶段堆积的黄土属于末次冰期盛期的产物,是干冷气候状况下,风力最强盛的时期。该时期堆积的黄土至今变化较小,最具有代表性,因而笔者以这个时期的黄土作为分析计算的基础。

中国黄土由直径小于 0.25mm 的颗粒组成,主要为粉土(0.05—0.005mm),其含量常常 > 50%。马兰黄土粒度成分的区域变化是,自西北向东南逐渐变细,根据细砂和粘粒含量可以分为砂黄土、黄土(粉质黄土)和粘黄土三个带<sup>[4]</sup>。

对马兰黄土的地球化学特征,笔者等作过较系统地研究<sup>[1]</sup>,但对黄土中化学元素的丰度尚未进行过专门的系统计算,本文的研究则填补了这一空白。

## 1.2 样品采集

从研究工作的系统性和样品分布的代表性出发,笔者在马兰黄土广泛发育的甘肃、宁夏、陕西、山西等省区,西起兰州,东到长治,北到毛乌素沙漠边缘,南达渭河北岸大约三十万平方公里范围内,布置了 9 条南北向或西北东南向的路线剖面,横穿黄土的三个带进行考察,并分别对砂黄土、黄土和粘黄土进行了详细的野外考察和厚度的测量;对马兰黄土上部层段(相当于 25000—10000aBP 间的沉积)进行了系统采样,一般取样深度距地表 2.5—3.0m,取样点之间间距为 25—30km,共采集黄土样品 147 块<sup>[5]</sup>。

# 2 元素的分析测试和丰度的计算方法

## 2.1 元素的分析方法

为了查明黄土中元素的丰度,选取有代表性的组合样品 100 块,对每个样品都测定了 54 种元素,包括主要元素、微量元素和稀土元素等。其中不少元素在黄土中尚属首次定量测定。

对所研究的常量元素其分析方法采用经典的化学分析法或原子吸收法。微量元素分别采用原子吸收法(Zn、Cu、Co、Ni、Pb、Ag);等离子体光谱法(Li、Rb、Cs、Be、Cr、V、Sr、Ba);极谱法(W、Sn、Mo);分光光度法(Nb、Ta、Zr、Hf、U、Th、Sc、Se)和选择性离子电极法(F、Cl、B)等。稀土元素用等离子体光谱法。各主要元素的分析误差(相对误差)均 < 5%,大多数微量元素的分析误差 < 10%,仅有少数含量极低的微量元素(其含量已属超微量范围)达到 20%。因此,各元素的分析结果完全可以达到研究元素丰度的要求。

## 2.2 元素质量加权平均丰度的计算方法

鉴于各带黄土的分布范围和厚度不同,而且在物质成分上仍存在某些差异。这就要求我们在进行元素丰度研究时,必须考虑到采样的合理性和准确掌握各黄土带的分布面积和厚度。在计算黄土中各种元素的平均丰度时必须采用质量加权平均的计算方法,才

能较为真实地反映马兰黄土中各元素的平均丰度。

在前人工作基础上,结合笔者野外的进一步考察和测量,得出了各黄土带的分布面积、平均厚度及容重(表 1)。根据表 1 所列的数据,我们即可计算出各黄土带的质量及质量权系数。这样,只要知道各黄土带各元素的平均丰度,就可以进而计算出整个马兰黄土各元素的质量加权平均丰度值。由此而得的元素平均丰度,更接近马兰黄土中各元素的真实丰度。

表 1 马兰黄土的分布面积、平均厚度及容重

Table 1 Distribution area average thickness and bulk density of Malan loess

黄土带 Loess belt	分布面积(S) Distribution area (km <sup>2</sup> )	平均厚度(H) Average thickness (m)	平均容重(D) Average bulk density (t/m <sup>3</sup> )
砂黄土带	66850	16	1.37
黄土带(粉黄土)	150895	9	1.43
粘黄土带	41990	5	1.51

### 3 元素的丰度特征

按上述的质量加权平均法,笔者首先分别计算了各带黄土的元素丰度,进而计算了整个黄土高原黄土的元素丰度值(表 2)。纵观黄土高原黄土元素的丰度特征可归纳为以下几点:

1. 就马兰黄土而论,各带(各区)黄土之间元素的丰度值彼此十分类似,差异很小。马兰黄土中各元素的变异系数都不大,除 Cl 以外,一般变化在 0.02—0.49 之间。黄土高原地区整个马兰黄土的稀土组成其差异也是比较小的,充分反映了它们物质成分的均一性和物源上的同一性<sup>[5]</sup>。

2. 在黄土高原马兰黄土自身化学元素背景上,粘黄土带的大部分元素如 Al、Ti、Fe、K、Mn、Ca、P、C、Zn、Cu、Co、Ni、Pb、Th、Sn、Zr、Hf、Li、Be、Rb、V 和 15 个稀土元素的含量偏高;而砂黄土带的 Si、Na、Cl、Ag 和 Mo 的含量偏高,其余大多数元素的含量偏低;粉质黄土带的 Ta、Sc、F、B 和 Cr 的含量偏高,而 Ba 的含量却偏低。

3. 与各类岩石中元素丰度相比,黄土中化学元素的丰度不同于超基性岩、基性岩、中性岩和酸性岩的丰度,而接近沉积岩的丰度值。

4. 在中国陆壳<sup>[6]</sup>的化学元素背景值,黄土高原黄土的大多数元素的含量偏低(贫化),而只有少数元素的含量偏高(表 2)。可见黄土高原的黄土层虽属中国陆壳组成的一部分,但它的物质确系远源不同类型岩石的风化碎屑经高度均匀混合的产物<sup>[1,7]</sup>。

5. 中国黄土的平均化学成分与世界各地黄土比较,在主要化学成分上既存在一定的差异,也有一定的相似性<sup>[1]</sup>。各国黄土在化学元素丰度上反映出来的一些差异,与各地黄土物质来源,黄土沉积区内各种地质、地理条件的差异都有关。

表 2 中国黄土中元素丰度与陆地地壳和上地壳的对比( $\mu\text{g}/\text{g}$ )

Table 2 Comparison of elemental abundance of loess in China with that of continental crust and upper crust

元素 Element	中国黄土(a) Chinese loess	中国陆壳(b) <sup>[8]</sup> Cont inental in China	陆地地壳(c) <sup>[8]</sup> Cont inental	上地壳(d) <sup>[9]</sup> Upper crust	丰度系数 Abundance coefficient		
					a/b	a/c	a/d
Ag	0.066	0.05	0.065	0.07	1.32	1.02	0.94
Al	62900	74500	83000	84700	0.84	0.76	0.74
B	63	15	10	10	4.2	6.30	6.30
Ba	513	610	400	700	0.84	1.28	0.73
Be	1.98	4.4	1.5	2.8	0.45	1.32	0.71
C	15050	5500	1200	—	2.74	12.54	
Ca	55709	43200	41000	25000	1.29	1.36	2.23
Ce	65.03	79	57	64	0.82	1.14	1.02
Cl	464.71	89	100	—	5.22	4.65	
Co	18.38	32	18	10	0.57	1.02	1.84
Cr	64.34	63	77	35	1.02	0.84	1.84
Cs	7.04	—	1.6	3.7		4.4	1.90
Cu	21.31	38	50	2.5	0.56	0.43	0.85
Dy	4.5	6.2	5.0	3.5	0.73	0.90	1.29
Er	2.62	2.6	3.0	2.3	1.01	0.87	1.14
Eu	1.12	1.6	1.2	0.88	0.70	0.93	1.27
F	485	990	470	—	0.49	1.03	
Fe	29275	50300	48000	35000	0.58	0.61	0.84
Gd	4.92	7.4	7.6	3.8	0.66	0.65	1.29
Hf	6.98	5.0	1.8	5.8	1.37	3.88	1.20
Ho	0.93	0.96	1.5	0.80	0.97	0.62	1.16
K	18689	23400	20000	27400	0.80	0.93	0.68
La	32.12	42	39	30	0.76	0.82	1.07
Li	32.29	44	22	20	0.73	1.47	1.61
Lu	0.42	0.41	0.93	0.32	1.02	0.45	1.31
Mg	14183	21500	21000	13900	0.66	0.68	1.02
Mn	501	780	1000	600	0.64	0.50	0.84
Mo	1.38	2.0	1.1	—	0.69	1.25	—
Na	13165	23600	25000	28200	0.56	0.53	0.47
Nb	10.37	34	20	2.5	0.31	0.52	0.41
Nd	27.53	46	28	26	0.60	0.98	1.06
Ni	33.76	57	61	20	0.59	0.55	1.69

续表 2

元素 Element	中国黄土(a)	中国陆壳(b) <sup>[6]</sup>	陆地地壳(c) <sup>[8]</sup>	上地壳(d) <sup>[9]</sup>	丰度系数		
	Chinese	Cont inental	Cont inental	Upper crust	Abundance coefficient		
	loess	in China			a / b	a / c	a / d
P	638	1900	1200	—	0.34	0.53	—
Pb	27.7	15	13	15	1.85	2.13	1.85
Pr	6.59	9.5	6.5	7.1	0.69	1.01	0.93
Rb	94.64	150	90	110	0.63	1.05	0.86
Sc	12.42	11	17	10	1.13	0.73	1.24
Se	0.11	0.074	0.059	—	1.49	1.86	—
Si	279512	270000	290000	308000	1.04	0.96	0.91
Sm	5.62	7.3	7.6	4.5	0.77	0.74	1.25
Sn	2.97	4.1	1.6	5.5	0.72	1.86	0.54
Sr	231	690	470	350	0.33	0.49	0.66
Ta	1.66	3.5	2.3	—	0.47	0.72	—
Tb	0.81	1.0	1.2	0.64	0.81	0.68	1.27
Th	11.53	17	6.8	10.5	0.68	1.70	1.10
Ti	3577	6600	5300	3600	0.54	0.67	0.99
Tm	0.42	0.43	0.28	0.33	0.98	1.50	1.27
U	2.64	5.6	2.2	2.5	0.47	1.20	1.06
V	79	99	120	60	0.80	0.66	1.32
W	1.44	2.4	1.2	1.5	0.60	1.20	0.96
Y	24.9	27	27	22	0.92	0.92	1.13
Yb	2.68	3.2	3.0	2.2	0.14	0.89	1.22
Zn	65.33	86	81	52	0.76	0.81	1.26
Zr	224	160	140	240	1.40	1.60	0.93

#### 4 黄土的平均化学成分与地壳克拉克值

地壳克拉克值(地壳的元素丰度)是指化学元素在地壳中的平均含量。自 19 世纪以来,国外许多著名学者,如克拉克(F.W.Clark)、戈尔德施米特(Y.M.Goldschmidt)、费尔斯曼(А.Е.ферсмэн)以及维诺格拉多夫(А.Л.Виноградов)等,都相继根据各自的观点和方法,利用当时已积累起来的大量实际资料从事这项研究。但他们对地壳的组成有不同的概念,获得地壳克拉克值的方法各不相同。如克拉克是根据采自世界各地完全不同的岩石类型的 5159 个分析数据求得算术平均值。而戈尔德施米特认为,岩石圈的平均化学成分可以用一种天然的平均样品来求出。他用挪威南部古老变质岩区内由冰融水沉积出来的 77 个垆姆样品的平均化学成分,求得同克拉克十分近似的结果<sup>[8]</sup>。同样维诺格拉多夫认为,沉积岩(指粘土和页岩)的平均化学成分就是地壳的平均化学成分,因而他于 1949 年,根据粘土和页岩的平均化学成

分求出了地壳元素丰度的数据<sup>[6]</sup>。60年代中期以来,黎彤等<sup>[8]</sup>采用分区和分岩类综合计算法,或区域地球化学计算法来进行地壳元素丰度的研究。在以上各种方法中,克拉克的方法工作量很大。黎彤的方法考虑虽比较全面,但计算也较为费事。戈尔德施米特的方法虽简单,但其代表性似乎不够全面。笔者认为可以用一种天然的平均样品来求得地壳克拉克值,但这种样品必须是经过高度均匀混合了的,且在大范围内布点取样,这样才能既简化方法又具有很好的代表性,才能更接近上部陆壳的真实情况。

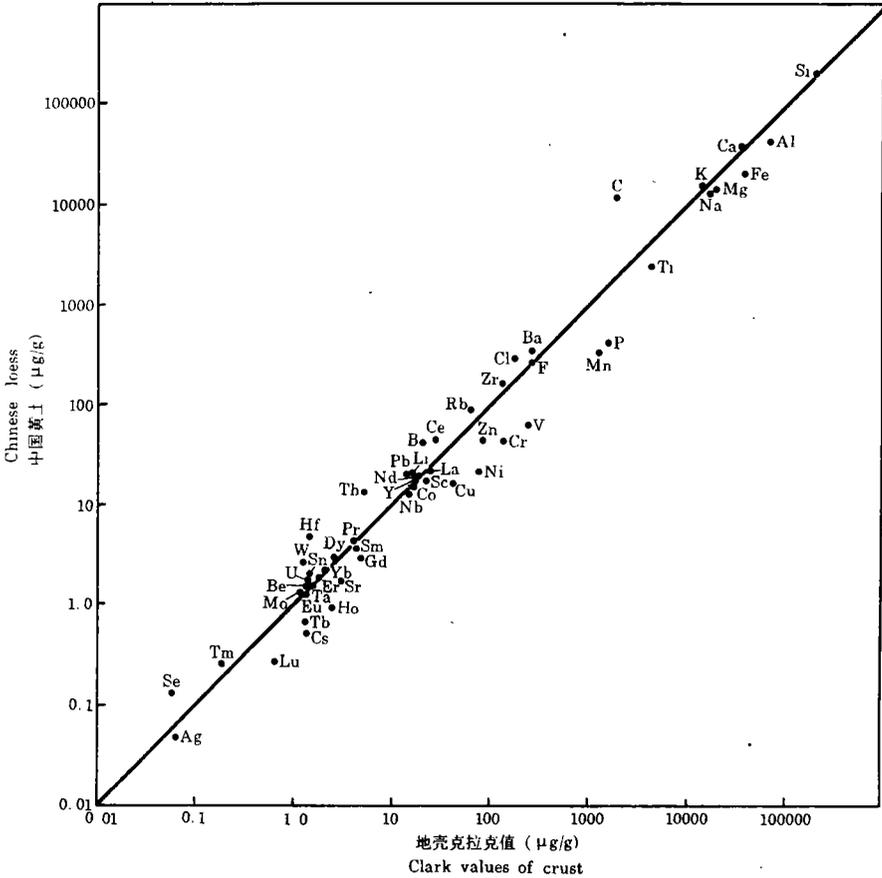


图1 中国黄土和地壳化学元素丰度的对比

Fig.1 Comparison of chemical elemental abundance of loess in China with that of crust

中国黄土高原典型的风成黄土(尤其是马兰黄土)正可满足上面的要求,是广大地区中不同类型岩石的碎屑经高度均匀混合的产物。为此,经笔者对马兰黄土的均匀布点,大面积的系统采样和分析计算结果表明,中国黄土的平均化学成分十分接近现在使用的地壳克拉克值(表2、图1)。黄土中除元素C以外,绝大多数元素的丰度值都处于各学者计算的地壳克拉克值范围之内,更接近陆地地壳<sup>[8]</sup>和上地壳<sup>[9]</sup>的元素丰度(表2)。从理论上来说,风成黄土的物源区很大,又是天然高度均匀混合,因而比前人的方法更合理、更具有代表性,更接近上部陆壳的真实情况。所以,笔者在此提出可以用黄土的平均化学成分来代表大陆上部地壳的平均化学组成,并认为这是研究地壳克拉克值的一条新途径,也是今

后研究黄土地球化学的一个新的方向。

## 参 考 文 献

1. 文启忠等, 1989: 中国黄土地球化学。276—278页, 64—94页, 115—145页, 科学出版社。
2. 刘东生、张宗祜, 1968: 中国的黄土。地质学报。42: 1—14页。
3. 刘东生等, 1985: 黄土与环境。16—18页, 81—98页, 208—218页, 科学出版社。
4. 刘东生等, 1966: 黄土的物质成分和结构。1—5页, 科学出版社。
5. 吴明清、文启忠、潘景瑜、刁桂仪, 1991: 黄河中游地区马兰黄土的稀土元素。科学通报, 第5期, 366—369页。
6. 黎彤、倪守斌, 1990: 地球和地壳的化学元素丰度。66—85页, 33页, 地质出版社。
7. 卢演侑、文启忠、黄伯钧、闵育顺、邓华兴, 1976: 中国黄土物质来源的初步探讨—石英粉砂颗粒表面结构的电子显微镜研究。地球化学, 第1期, 47—53页。
8. 黎彤、饶纪龙, 1965: 论化学元素在地壳及其基本构造单元中的丰度。地质学报, 45: 82—91页。
9. Taylor, S. R., McLennan, S. M. and Mcculloch, M. T., 1983: Geochemistry of loess, Continental Crustal Composition and Crustal Model Ages. Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 1897—1905.

## COMPARISON OF AVERAGE CHEMICAL COMPOSITION OF LOESS IN LOESS PLATEAU WITH CLARK VALUES OF CRUST

Wen Qizhong Diao Guiyi and Pan Jingyu

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 510640)

Wu Mingqing

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang)

### Summary

Authors systematically collected 147 samples (at last constituting 100 samples for analysis) of Malan Loess in Loess Plateau and 54 elements were analysed for each sample. Abundance of each element was calculated by means of weighted average method.

The results showed that chemical compositions of loess were very similar to each other in all parts of Loess Plateau with a good characteristic of homogeneity. Moreover, the average chemical compositions of loess were very close to Clark values of crust, which are used at present. Therefore, the average chemical compositions of loess may be used to represent average chemical constituents of continental upper crust. From theoretical point of view, typical eolian loess has a very large area of material sources and was also mixed homogeneously. Consequently, using it to calculate Clark values of upper crust should be more reasonable, more representative and more substantial than previous methods. Therefore, it could be a new way for investigation of Clark values of crust and a new field of loess geochemistry study in future.

**Key words** Chemical composition of loess, Clark values of crust, Loess Plateau