

矿源层地球化学元素在黄土盖层中 纵向分布的趋势提取与应用

徐德义^{1,2}, 裴宏伟^{1,6}, 刘宁强^{2,3}, 袁兆宪⁴, 杨 玠⁴, 谢淑云⁵, 成秋明^{2,4*}

1. 中国地质大学经济管理学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
4. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
5. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
6. 厦门大学经济学院, 福建厦门 361005

摘要: 在内蒙草原覆盖区迪彦钦阿木 Mo-Ag 矿床长度为 106.5 m 黄土覆盖层垂直岩心上等间距顺序取样 106 个, 用 Niton XL3t X-荧光仪测得每个样本的 33 个元素的含量。在正态性检验的基础上, 用 Kendall τ 相关系数分析了元素含量与深度的相关性, 得出黄土覆盖层中 Mo、S、W、Te、Fe、Cu、Ni、Mn、Sb、Rb、Cs、Sn、Zn、Ti、V、Pb、Th、As 这 18 种元素含量与离开矿源的距离具有显著相关性; 用 HP 滤波法分离出这 18 种元素含量空间序列的长期趋势, 并用变量聚类分析法对长期趋势进行了分类; 用因子分析得到了迪彦钦阿木矿床 Mo-W 成矿因子和 Pb-Zn 成矿因子, 并模拟得到 Mo-W 成矿因子的指数分布模式。本文的研究思路与结论可为覆盖区表层地球化学异常对矿产预测的指示作用研究提供借鉴。

关键词: 覆盖区; 空间序列; Kendall τ 相关系数; HP 滤波; 聚类分析; 地球化学; 成矿预测; 矿床。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2012)06-1133-07

收稿日期: 2012-07-19

Extraction and Applications of the Long-Term Vertical Distribution Trends of Geochemical Elements in the Loess Cover

XU De-yi^{1,2}, PEI Hong-wei^{1,6}, LIU Ning-qiang^{2,3}, YUAN Zhao-xian⁴,
YANG Jie⁴, XIE Shu-yun⁵, CHENG Qiu-ming^{2,4*}

1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Faculty of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
6. Faculty of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: 106 samples were sequentially collected from a 106.5 m vertical core of the loess cover on the Diyanqinamu Mo-Ag deposit in the grassland area in the Inner Mongolia. The contents of 33 elements were measured by Niton XL3t X-ray fluorescence analyzer. After the normality test, the correlation between the contents of elements and the depth were analyzed by Kendall τ correlation coefficient method, which shows that the contents of 18 elements Mo, S, W, Te, Fe, Cu, Ni, Mn, Sb, Rb, Cs, Sn, Zn, Ti, V, Pb, Th and As from the loess cover are statistically correlated with the distances from the ore source. The long-term trends of the 18 elements were detached from the content spatial series, which were classified into several clusters. Ore-forming factors Mo-W factor and Pb-Zn factor were obtained by factor analysis, and the exponent transportation modes of

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 40972205, 41272362); 中国地调局项目 (Nos. 1212010633910, 1212011121101); “863”项目 (No. 2009AA06Z110).

作者简介: 徐德义 (1964—), 博士, 教授, 研究方向为数学地质、应用统计. E-mail: xdy@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 成秋明, E-mail: qiuming@cug.edu.cn

the Mo-W factor were simulated. The research approach and results of this paper could be useful references for evaluating mineral resources of covered areas from the surface geochemical anomalies.

Key words: covered area; spatial series; Kendall τ correlation coefficient; HP filtering; cluster analysis; geochemistry; ore prospecting; ore deposits.

0 引言

覆盖区找矿的技术途径之一是通过表层地球化学元素的弱缓异常推断隐伏矿体(成秋明和夏庆霖, 2011), 来自矿体的元素在矿体上方覆盖层纵向上的迁移规律研究无疑有助于加深对弱缓异常形成机理的理解. 事实上, 元素在不同介质中的迁移规律研究吸引了越来越多的不同领域的科学工作者(Allègre and Minster, 1978; 谢学锦和王学求, 2003; Cameron *et al.*, 2004; 阮心玲等, 2006; 张生等, 2009; 胡舸等, 2010; 金中国等, 2011).

Basu and Molinaroli(1994)研究了亚得里亚海附近 9 个污染源处不同金属元素的传播模式. 根据污染物的传播速率与其浓度成正比、与其到污染源的距离成反比的机理, 建立了微分方程, 从而得到污染物传播的指数模型, 并利用实际数据得出了不同元素的平均传播速率, 验证了污染物的传播是否受到植物和潮流的影响.

Tyler(2004)想要对瑞典南部的 Haplic Podzol 矿中 44 种微量元素在土壤中的纵向迁移进行描述、评价和比较, 该矿已经形成了很多年, 而且没有受到外界的干扰, 所以很有代表意义. 他采用的方法是先竖直向下深挖 20 m, 获得土壤样本, 再用 ICP-MS 和 ICP-AES 仪器测得样本中元素的含量, 然后绘制出了每种元素在纵向上的含量分布图, 之后, 他又对所有的元素进行因子分析, 得出了 3 个因子. 在第 1 个因子上载荷较大的元素有 23 种, 它们大部分是镧系元素和其他稀有元素; 在第 2 个因子上载荷较大的元素是碱元素; 在第 3 个因子上载荷较大的元素只有 Fe 和 Ga. 最后得出的结论是 Pb 和 Cd 元素的异常能够对矿产的预测提供大量信息.

王学求(2005)通过揭穿覆盖层的系统取样研究, 发现以下事实: 在矿体上方表层覆盖物中细粒级(100 目)样品中金的含量普遍高于粗粒级样品中的含量, 矿体上方异常明显, 最高含量可达 30 ng/g, 是背景值的 10 倍. 而粗粒级样品中 Au 含量变化不明显, 矿体上方无异常显示; 在地表所发现的地球化学异常峰值基本位于矿体正上方, 表现为明显的垂直迁移特征; 成矿元素和伴生元素在矿体上方土壤垂

直剖面中呈双层分布或在柱状图上呈现“C 型”分布的模式, 即在剖面底部靠近矿体的风化层中和垂直剖面顶部的土壤层中元素的含量高, 而在剖面的中间位置出现低含量分布.

Anand and Paine(2002)、Wakelin *et al.* (2012)采集了澳大利亚西部的一座 Ag-Cu-Zn 矿上方的数据, 他分别采集了矿床上方和无矿上方的元素含量, 又在 2 种地表分别采集落叶覆盖和垃圾覆盖的元素含量, 分析了不同覆盖层对元素迁移的影响. 他先运用因子分析将元素分为几类, 再利用方差分析分析 2 种介质对元素迁移是否有影响, 得出的结论是植物的落叶在地上被微生物分解后渗透到地下, 使得元素富集, 这种现象尤其在 Cu 和 Zn 上明显, 在矿上方的有植物覆盖的元素含量比没有矿的植物覆盖的元素含量高.

我国黄土覆盖面积多达 60 万 km² (刘东生, 1965), 占国土面积的 6% 以上, 具有巨大的找矿潜力. 笔者认为矿源层地球化学元素在黄土覆盖层中的迁移受到很多因素的影响. 跟矿源层元素属性、元素组合、温度、压力等有关; 跟土壤盖层元素分布、物性(粒级及其分布、压实度、湿度、温度梯度)有关; 跟重力、地磁有关; 跟表层气候、生物活动及地理条件有关. 迁移过程是化学过程(反应扩散、结晶、沉淀等)与物理过程(输运、渗滤、离子吸附等)的动态复杂耦合. 目前单一条件或少数条件控制的实验研究比较多. 笔者将岩心自下而上等间距顺序数据看成空间序列, 将浓度扩散看成主控因素, 其他因素看成随机因素, 用统计方法探讨元素纵向分布与纵向坐标的相关性, 用滤波的方法剔除随机因素的影响, 提取元素迁移的长期趋势, 进而对长期趋势进行分类与模拟, 得到元素纵向迁移模式, 为今后的深入研究提供借鉴.

1 地质背景与数据获取

本研究属实验性工作, 实验对象为位于内蒙古锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗迪彦钦阿木大型铜—银矿床土壤岩心. 该矿床位于东经 180° 12' 00" ~ 180° 14' 00", 北纬 46° 00' 00" ~ 46° 01' 30", 地表平均海

拔高度约 1 020 m,地形平缓,起伏约 40 m. 该矿床是与中生代中酸性岩浆活动有关的构造一蚀变岩型钼一银矿床,钼一银矿化大都在侏罗系火山一沉积岩地层中呈脉状、浸染状和网脉状产出,构成透镜状和脉状矿体. 金属矿物有辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、磁铁矿和方铅矿,脉石矿物有石英、绢云母、绿泥石、绿帘石和透闪石. 另外,近矿体热液蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化(聂秀兰和侯万荣,2010).

矿床覆盖层是第三系和第四系黄土,地表是草原,黄土覆盖层厚度 10±~150±m,几乎不见腐植层,黄土有细沙状、粉沙状和泥质块状,其中少见砾石. 覆盖层之下即见矿化.

本文所取垂直岩心黄土厚度 106.5 m,自地表下 0.5 m 开始等间距取样 106 个,用便携式 Niton XL3t X- 荧光仪测得 106 个样本的 33 种元素含量,这些元素包括 Mo、S、K、Fe、Zn、Pb、Au、Ca、Ti、Mn、W、Cu、Sc、V、Se、Zr、Sr、U、Rb、Th、As、Hg、

Ni、Co、Cr、Ba、Cs、Te、Sb、Sn、Cd、Ag 和 Pd. 笔者将地表以下 106.5 m 处矿源层与覆盖层的接触面看作起始点,自下而上等间距元素含量看作空间序列,得到 33 个空间序列,每个序列 106 个观测值.

2 元素空间序列的长期趋势

2.1 正态性检验

笔者对数据进行了基本的描述统计分析,由于 Se 和 Ag 的观测值大多低于仪器检测限,在本次研究中不做考虑. 首先用 SW 统计量(Shapiro and Wilk,1965)对每个元素的含量分布进行了正态性检验,发现在 0.05 水平上,只有 Zr 元素含量通过了正态检验,其他 30 个元素的含量均不服从正态性分布(表 1). 按照大数定律的原理,除 Zr 之外,其他 30 个元素含量的空间序列中随机因素都没有起到主要作用,笔者认为浓度扩散这一确定性因素起主导作

表 1 描述性统计分析、正态性检验和相关性分析

Table 1 Descriptive analysis, normality test and correlation analysis

元素	描述统计		正态性检验		相关性检验		
	均值	标准差	SW 统计量	显著性 p 值	Kendall τ	显著性 p 值	相关性
Mo	16.62	47.03	0.406	<0.001	0.586	<0.000 1	相关
S	674.98	1 275.00	0.500	<0.001	0.170	0.009 9	相关
K	20 865.00	4 887.00	0.864	<0.001	0.033	0.617 0	不相关
Fe	24 756.00	12 997.00	0.261	<0.001	0.411	<0.000 1	相关
Zn	177.04	305.45	0.468	<0.001	0.423	<0.000 1	相关
Pb	36.95	42.62	0.744	<0.001	0.298	<0.000 1	相关
Au	0.27	0.95	0.299	<0.001	0.142	0.071 2	不相关
Ca	17 326.00	11 254.00	0.926	<0.001	-0.034	0.605 9	不相关
Ti	3 269.00	1 079.00	0.948	0.004	0.212	0.001 3	相关
Mn	1 459.00	3 495.00	0.245	<0.001	0.514	<0.000 1	相关
W	14.28	30.19	0.550	<0.001	-0.134	0.397 0	不相关
Cu	37.59	22.64	0.929	<0.001	0.492	<0.000 1	相关
Sc	16.89	27.86	0.659	<0.001	0.084	0.247 6	不相关
V	55.63	36.41	0.953	<0.001	0.198	0.002 7	相关
Zr	283.89	71.06	0.980	0.106	0.116	0.075 5	不相关
Sr	182.82	97.41	0.837	<0.001	-0.021	0.575 7	不相关
U	1.03	2.47	0.467	<0.001	-0.030	0.757 6	不相关
Rb	115.03	63.87	0.738	<0.001	0.400	<0.000 1	相关
Th	13.28	6.77	0.714	<0.001	0.207	0.001 6	相关
As	10.38	7.99	0.913	<0.001	0.107	0.103 0	不相关
Hg	0.20	0.78	0.273	<0.001	0.052	0.542 0	不相关
Ni	80.38	24.29	0.868	<0.001	0.345	<0.000 1	相关
Co	34.20	68.69	0.555	<0.001	-0.047	0.577 0	不相关
Cr	0.76	4.92	0.145	<0.001	-0.325	0.244 0	不相关
Ba	577.96	158.02	0.882	<0.001	0.098	0.136 0	不相关
Cs	66.56	30.12	0.859	<0.001	0.209	0.001 4	相关
Te	37.75	39.18	0.851	<0.001	0.135	0.045 5	相关
Sb	14.53	20.40	0.740	<0.001	0.163	0.021 0	相关
Sn	15.12	20.15	0.765	<0.001	0.343	<0.000 1	相关
Cd	0.68	2.89	0.250	<0.001	0.094	0.232 2	不相关
Pd	0.18	1.12	0.158	<0.001	0.027	0.732 0	不相关

用,即意味着这些序列存在长期趋势(long-term trend),这为进一步分析提供了理论依据。

2.2 元素含量与纵向坐标的相关性分析

正态性检验初步说明矿源层垂向上方元素的含量分布不是随机因素主导的,确定性因素起主要作用,这与前人的研究成果相吻合。如果确定性因素来自矿源层,那么元素的含量在纵向上就应该具有一定的顺序性,也就是说,元素含量与纵向坐标具有某种相关性,笔者尝试用统计方法对这种相关性进行检验。统计学中分析 2 个变量的相关性方法有多种,其中参数方法有 Pearson 统计量检验法,它是以母体服从正态分布为前提的;另外,笔者通过观察原始数据发现几乎所有的元素含量与距矿源的距离不是线性相关的,亦即如果有相关性,必定是存在非线性关系。非参数方法是不需要正态假设,并适合非线性相关性情形的检验,常用的统计量有 Spearman 和 Kendall τ 相关系数检验法。由此,笔者借助统计软件 SAS 进行非参数相关性检验,得到在 0.05 水平上(表 1),离开矿源垂向向上的距离与对应点元素的含量有显著统计关系的元素有 18 种:Mo、S、Fe、Zn、Pb、Ti、Mn、W、Cu、V、Rb、Th、As、Ni、Cs、Te、Sb 和 Sn。Zr 元素用参数检验,没有显著相关性。虽然迪彦钦阿木是 Mo-Ag 矿床,但 Ag 元素含量在采样点处大多数都低于检出限,原始数据不能检验其相关性,故不作考虑。

2.3 长期趋势提取及分类

以上 18 个元素含量与纵向坐标有相关性,说明

它们在覆盖层中的纵向迁移具有某种规律,为了凸显这种规律性,需要剔除随机因素的影响。

HP 滤波(Hodrick and Prescott, 1997)是从时间序列中分离长期趋势与随机波动的方法,在经济学中应用很广泛(Ahumada and Garegnani, 1999; Ravn and Uhlig, 2002),但往往是剔除长期趋势来研究随机波动及其周期性,笔者借助这一方法,即通过剔除随机波动来提取长期趋势。HP 滤波模型为:

$$y_t = g_t + c_t, \quad (1)$$

式中: y_t 是给定的时间序列, g_t 是趋势项, c_t 是波动项。其中 g_t 是下列优化问题的解:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T (y_t - g_t)^2 + \lambda \sum_{t=1}^T [(g_{t+1} - g_t) - (g_t - g_{t-1})]^2 \right\}, \quad (2)$$

式中: T 是序列的长度, λ 是平滑参数, λ 越大趋势序列越平滑,其取值方法前人做了一些研究(Ravn and Uhlig, 2002),经验值和实验观察法具有较好的实用性。该模型适合具有确定性趋势和随机周期波动叠加的时间序列分析。

笔者将土壤盖层中每个矿源地球化学元素浓度在离开矿源的纵向等间距顺序数据看作一个空间序列,将时间序列分析的 HP 滤波方法用于该序列,经反复实验选取参数 λ 为 1 600。为了比较不同元素的迁移模式,笔者对原始数据进行了规范化,使得序列取值都落在 $[0,1]$ 区间中,地表之下 106 m 处出现母

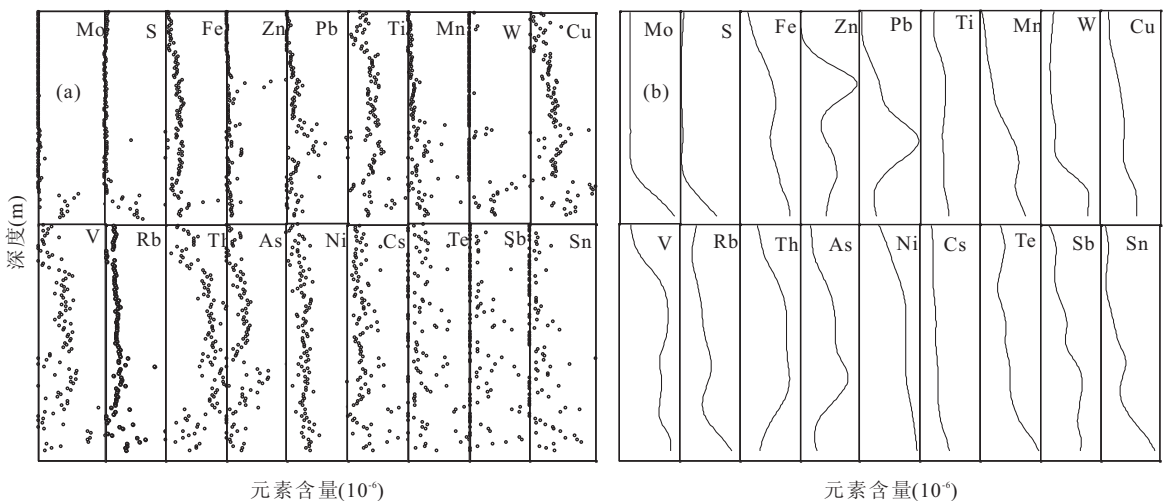


图 1 18 个元素纵向分布散点图(a) 和 HP 滤波得到的元素含量纵向长期趋势图(b)

Fig. 1 Scatter plot of the contents of 18 elements against vertical depth (a) and the long-term trend plot of the contents of the 18 elements from HP filtering (b)

横坐标为元素含量,规范化到 $[0,1]$ 区间;纵坐标自下而上是离开矿源层的距离

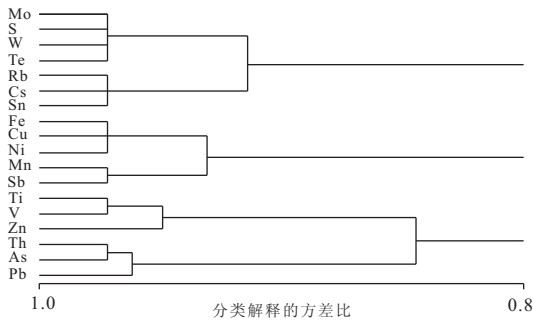


图 2 元素分布趋势分类谱系

Fig. 2 Hierarchical plot of the long-term distribution trend of the elements

岩,石英脉中出现矿化,故而含量数据取到地表以下 106 m 处,部分与纵坐标具有显著相关性元素的序列图如图 1a 所示,HP 滤波得到的长期趋势如图 1b 所示。

从 HP 滤波得到的长期趋势可以看出,Mo、S、Fe、Mn、W、Cu、Rb、Ni、Cs、Te、Sb、Sn 的含量基本上是从矿源层到地表单调递减,说明这些元素的迁移是源自矿源的,它们在地表的含量信息对矿源有指示作用。S、Rb 在地表附近有增加的趋势,可能是地表的因素叠加所致。V、Pb、Zn、Ti、As、Th 在中间出现峰值,呈现从矿源到地表有先增后减的形态,其机理或原因有待今后深入研究。笔者基于相关系数矩阵对 18 种元素的长期趋势进行分类(图 2)。当解释的方差比达到 79% 时,元素分成了 2 类: $C_{21} = \{Mo, S, W, Te, Rb, Cs, Sn, Fe, Cu, Ni, Mn, Sb\}$, $C_{22} = \{Ti, V, Zn, Th, As, Pb\}$; 当解释的方差比为 85% 时,元素分为 3 类: $C_{31} = \{Mo, S, W, Te, Rb, Cs, Sn\}$, $C_{32} = \{Fe, Cu, Ni, Mn, Sb\}$, $C_{33} = C_{22} = \{V, Pb, Zn, Ti, As, Th\}$ 。 C_{21} 类元素浓度自下而上近似呈递减趋势,而其中 C_{31} 近似呈指数递减趋势, C_{32} 近似线性递减,笔者用曲线拟合和线性回归方法验证了这些结论(篇幅所限未列出具体的结论)。

3 成矿因子的分布模式

3.1 成矿因子

在成矿过程中地球化学元素往往是伴生的,因此人们通常用因子分析法提取元素组合来研究成矿过程的性质。此外,笔者认为成矿因子比单个的成矿元素具有更稳定的迁移性质,故而对 18 种元素进行了因子分析,得到 2 个因子(表 2,图 3)。其中,第 1 个因子的方差贡献率为 66.1%,与该矿床成矿过程

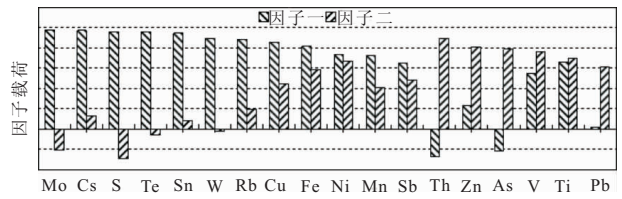


图 3 成矿因子载荷柱状图

Fig. 3 Loadings of ore-forming factors

有关的 Mo、S、W 等元素的载荷大,将其称为 Mo-W 成矿因子;第 2 个因子与第 1 个因子的累计方差贡献率为 99.7%,在第 2 个因子中 Pb、Zn 等元素的载荷大,将其称为 Pb-Zn 成矿因子。

3.2 成矿因子的迁移模式

笔者计算了 Mo-W 成矿因子和 Pb-Zn 成矿因子的得分,提取其长期趋势(图 4)。可以看出与单个成矿元素相比,成矿因子的长期趋势曲线更光滑,趋势更明显。Pb-Zn 因子呈多项式模式,没有递减的趋势,因此认为它所反映的信息不是来自矿源层;Mo-W 成矿因子具有典型的指数分布模式,因子含量自矿源层往上单调递减,而在离矿源层约 50 m 处出现水平台阶,而后递减。水平台阶的出现是一个有趣的现象,笔者认为它可能是来自矿源层的元素迁移过程及地表扰动过程的“结合”部位,两过程在此部位“相持”致使水平台阶的出现。考虑到数学角度的拟合优度,笔者分 2 种情况进行了拟合:整个区间上的拟合分 $[0, 68.5]$ 和 $[68.5, 106.0]$ 两段进行,拟合结果都通过了统计检验。如引言所述,元素在介质中的迁移模式往往受到多尺度(强度)、多因素和多过程叠加影响,笔者只从统计检验角度选择了指数分布模式进行拟合。最近,成秋明(Cheng, 2012)用串级(Cascade)思想建立了元素分布的分形模型,即幂律(power-law)模型,取得了很好的效果,这一思想能更好地揭示元素纵向分布的形成机制,所建立的模型具有更好的实用性,它是传统统计方法的深入。

拟合的结果为①深度范围为 $[0, 106]$ 时,

$$C_{F1} = 4.387e^{-0.06989h} - 0.5917, \quad (3)$$

式中:拟合优度 $R^2 = 0.96$, 迁移速率为:

$$C'_{F1} = -0.3066e^{-0.06989h}. \quad (4)$$

②分段拟合:

$$C_{F1} = \begin{cases} 4.358e^{-0.086h} - 0.3478 & (R^2 = 0.9793) (h < 68.5) \\ 0.0003529h^2 - 0.077h + 3.31 & (R^2 = 0.9989) (h \geq 68.5), \end{cases} \quad (5)$$

迁移速率为:

表 2 成矿因子

Table 2 Ore-forming factors

	Mo	Cs	S	Te	Sn	W	Rb	Cu	Fe	Ni	Mn	Sb	Th	Zn	As	V	Ti	Pb	Ω
F1	0.974	0.970	0.956	0.955	0.942	0.894	0.882	0.857	0.811	0.732	0.725	0.651	-0.268	0.228	-0.210	0.542	0.656	0.014	0.661
F2	-0.206	0.131	-0.293	-0.057	0.082	-0.024	0.191	0.442	0.585	0.665	0.404	0.485	0.891	0.808	0.784	0.759	0.695	0.614	0.997

注: Ω 是因子的累计方差贡献率, 第 1 个因子 F1 方差贡献率为 66.1%; 前 2 个因子的累计方差贡献率为 99.7%。

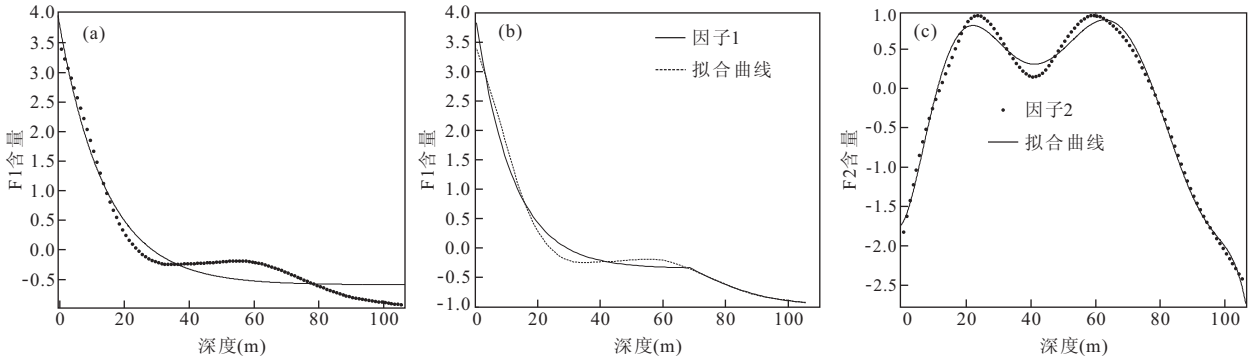


图 4 因子得分及拟合曲线

Fig. 4 Scoring and fitted curves

虚线为因子得分, 实线为拟合曲线; 横坐标为深度, 纵坐标为因子的含量; a. 深度范围为 [0, 106] 的因子一得分及拟合曲线; b. 分 [0, 68.5] 和 [68.5, 106] 两段拟合的因子一得分及拟合曲线; c. 因子二得分及拟合曲线

$$C'_{Factor1} = \begin{cases} -0.374e^{-0.086h} & h < 68.5 \\ 0.0007058h - 0.077 & h \geq 68.5 \end{cases} \quad (6)$$

第 2 个成矿因子表现出完全不同的模式 (图 4c), 显示该因子的分布反映的不是来自矿源的信息。

4 结论及讨论

将岩心等间距顺序元素成分数据看成空间序列, 用统计方法检验序列与纵向坐标具有相关性的元素, 进而用滤波方法提取具有相关性元素成分序列的长期趋势, 并对其分类, 判断其中的有源迁移模式并对其拟合, 所得定量迁移模型有助于把握覆盖层中来自于矿源层元素的迁移规律, 为表层地球化学异常揭示埋深矿床的属性提供依据。由于每种矿床中与成矿有关的地球化学元素的组合 (相伴) 模式不同, 提取成矿因子, 用上述方法对成矿因子的迁移模式进行研究具有更现实的指导意义。

笔者对迪彦钦阿木 Mo-Ag 矿床黄土覆盖层岩心数据分析得到: (1) X- 荧光仪测得的 33 种元素中 Mo、S、Fe、Zn、Pb、Ti、Mn、W、Cu、V、Rb、Th、As、Ni、Cs、Te、Sb 和 Sn 与纵向坐标有显著相关性; (2) Mo、S、W、Te、Rb、Cs、Sn、Fe、Cu、Ni、Mn 和 Sb 元素含量由矿源层向地表几乎呈递减趋势, 它们的含

量对矿源层具有指示作用; (3) 成矿因子比单个元素在覆盖层中的迁移性质更稳定, 对矿源层矿化性质的指示作用更强。

本文对许多问题的研究需待深化。 (1) 影响矿源层元素纵向迁移的确定性因素和随机因素的强弱分析。用滤波方法剔除随机因素而获取长期趋势可能受到各种因素强弱的影响, 可能因为随机因素强而干扰确定性因素的提取, 可能对不同元素而言随机因素的影响程度不一样; (2) 数据的采集手段和方法直接影响迁移模型的准确性, 本例所用便携式 X- 荧光仪获取的数据是一种半定量数据, 采样密度是 1 m, 筛选粒级是 60 目, 不同的采样方式对结果的影响值得深入研究; (3) 覆盖层中元素的纵向迁移模式作为表层地球化学异常与埋深矿床之间关系的桥梁, 三者之间的定量关系建立具有很强的实践意义。

References

- Ahumada, H., Garegnani, M. L., 1999. Hodrick-prescott filter in practice. *Economia*, 45(3): 61-76.
- Allègre, C. J., Minster, J. F., 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25. doi: 10.1016/0012-821X(78)90123-1
- Anand, R. R., Paine, M., 2002. Regolith geology of the Yilgarn Craton, western Australia; implications for explo-

- ration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49(1): 3—162. doi:10.1046/j.1440-0952.2002.009.12.x
- Basu, A., Molinaroli, E., 1994. Toxic metals in Venice lagoon sediments: model, observation, and possible removal. *Environmental Geology*, 24(3): 203—216. doi:10.1007/BF00766890
- Cameron, E. M., Hamilton, S. M., Leybourne, M. I., et al., 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1): 7—32. doi:10.1144/1467-7873/03-019
- Cheng, Q. M., 2012. Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas. *Journal of Geochemical Exploration* (in press).
- Cheng, Q. M., Xia, Q. L., 2011. Thoughts and practice for the integrated assessment of mineral resources in covered areas. *Mineral Journal*, (S1): 755—756 (in Chinese with English abstract).
- Hodrick, R. J., Prescott, E. C., 1997. Postwar U. S. business cycles: an empirical investigation. *Journal of Money, Credit and Banking*, 29(1): 1—16.
- Hu, K., Peng, S., Zhang, S. T., 2010. Numerical simulation of contaminant transport problems in soil environment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 4(7): 1660—1663 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. G., Xiang, X. L., Huang, Z. L., et al., 2011. Research on the element migration in bauxite deposit at Wuchuan Wachang in Guizhou north plain. *Geology and Exploration*, 47(6): 957—966 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. S., 1965. Chinese loess. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Nie, X. L., Hou, W. R., 2010. The discovery of the Diyanqinamu large Mo-Ag deposit in Inner Mongolia and its geology significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 469—472 (in Chinese with English abstract).
- Ravn, M. O., Uhlig, H., 2002. On adjusting the Hodrick-Prescott filter for the frequency of observations. *The Review of Economics and Statistics*, 84(2): 371—376. doi:10.1162/003465302317411604
- Ruan, X. L., Zhang, G. L., Zhao, Y. G., et al., 2006. The distribution characteristics and migration rate of heavy metals in the soil based on high density sampling. *Environmental Science*, 27(5): 1020—1025 (in Chinese with English abstract).
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3—4): 591—611.
- Tyler, G., 2004. Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol. *Geoderma*, 119(3—4): 277—290. doi:10.1016/j.geoderma.2003.08.005
- Wakelin, S., Anand, R. R., Macfarlane, C., et al., 2012. Assessing microbiological surface expression over an overburden-covered VMS deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 262—271. doi:10.1016/j.gexplo.2011.09.005
- Wang, X. Q., 2005. Conceptual model of deep-penetrating geochemical migration. *Geological Bulletin of China*, 24(10—11): 892—896 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Wang, X. Q., 2003. Progress in deep-penetrating geochemistry. *Earth Science Frontier*, 10(1): 225—238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Xiong, X. L., Seward, T. M., 2009. The migration of ore forming elements in gaseous phase and experimental studies. *Earth Science Frontier*, 16(1): 68—74 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 成秋明, 夏庆霖, 2011. 覆盖区矿产综合预测思路与实践. *矿物学报*, (S1): 755—756.
- 胡舸, 彭帅, 张胜涛, 2010. 土壤环境下污染物运移问题的数值模拟研究. *环境工程学报*, 4(7): 1660—1663.
- 金中国, 向贤礼, 黄智龙, 等, 2011. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究. *地质与勘探*, 47(6): 957—966.
- 刘东生, 1965. 中国的黄土堆积. 北京: 科学出版社.
- 聂秀兰, 侯万荣, 2010. 内蒙古迪彦钦阿木大型钼—银矿床的发现及地质意义. *地球学报*, 31(3): 469—472.
- 阮心玲, 张甘霖, 赵玉国, 等, 2006. 基于高密度采样的土壤重金属分布特征及迁移速率. *环境科学*, 27(5): 1020—1025.
- 王学求, 2005. 深穿透地球化学迁移模型. *地质通报*, 24(10—11): 892—896.
- 谢学锦, 王学求, 2003. 深穿透地球化学新进展. *地学前缘*, 10(1): 225—238.
- 张生, 熊小林, Seward, T. M., 2009. 成矿元素的气相迁移与实验研究. *地学前缘*, 16(1): 68—74.