

基于边界调平法的多图幅地球化学数据 系统误差校正研究

唐瑞^{1,2}, 李程^{1,2*}, 肖克炎^{1,2}

1. 成都理工大学 数学地质四川省重点实验室, 成都 610059; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

摘要: 针对白音查干东山-毛登地区地球化学数据中的台阶效应问题, 本研究旨在比较衬度返回法与边界调平法的调平效果, 评估不同方法在消除图幅间误差和提高数据质量方面的适用性。通过使用成分数据变换对6个图幅的地球化学数据进行预处理, 分别采用基于均值和中位数的衬度返回法和边界调平法进行调平处理, 并对比它们在消除台阶效应和提高数据连续性方面的效果。结果表明, 无论是基于均值还是中位数的衬度返回法, 均未能有效消除台阶效应, 特别是在地质背景差异较大的区域; 而边界调平法能够有效消除台阶效应, 尤其适用于地质背景一致的区域, 并且在大比例尺图幅中表现最佳。研究证实, 边界调平法在处理地球化学数据台阶效应方面优于衬度返回法。本研究为复杂区域的地球化学数据处理提供了有效的调平方法。

关键词: 数据调平; 白音查干东山-毛登; 成分数据变换; 衬度返回法; 边界调平法

中图分类号: P632 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260016

Research on the systematic deviation calibration of multi-sheet geochemical data based on the boundary leveling method

TANG Rui^{1,2}, LI Cheng^{1,2*}, XIAO Ke-yan^{1,2}

1. Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Regarding the “step effect” issue in the geochemical data of the Baiyinchagan Dongshan-Maodeng area, this study aims to compare the leveling effects of the contrast return method and the boundary leveling method, and to evaluate the applicability of these methods in eliminating deviations between maps and improving data quality. The geochemical data of six sheets in the study area were preprocessed using compositional data transformation. The preprocessed data were then leveling processed using both the mean-based and median-based contrast return methods, as well as the boundary leveling method. The effectivenesses of these methods in eliminating step effect and improving data continuity were then compared. The results show that the step effect cannot be effectively eliminated by using both the mean-based and median-based contrast return methods, especially for data of areas with relatively significant geological background differences. In contrast, the step effects of geochemical data can be effectively eliminated using the boundary leveling method for processing, particularly for data of areas with consistent geological backgrounds, with the best performance of large-scale maps. The study confirms that the boundary leveling method is more effective than the contrast return method for addressing the step effect of geochemical data. This research provides an effective leveling approach for processing geochemical data of complex regions.

收稿编号: 2025-0189, 2025-09-25 收到, 2026-01-22 改回

基金项目: 国家科技重大专项课题(2024ZD1003206, 2025ZD1008203)

第一作者简介: 唐瑞(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向: 地质学. email: tangrui0223@163.com

*通信作者简介: 李程(1987—), 副教授, 研究方向: 地球化学及数学地质. email: leecheng@cdut.edu.cn

引用此文:

唐瑞, 李程, 肖克炎. 2026. 基于边界调平法的多图幅地球化学数据系统误差校正研究. 矿物岩石地球化学通报, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260016

Tang R, Li C, Xiao K Y. 2026. Research on the systematic deviation calibration of multi-sheet geochemical data based on the boundary leveling method. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260016

Key words: data leveling; Baiyinchagan Dongshan–Maodeng; component data transformation; contrast return method; boundary leveling method

0 引言

勘查地球化学是区域找矿工作的核心技术手段之一。依托“区域化探全国扫面计划(RGNR)”,1981—2005年,我国原地矿及国土资源部门共圈定异常58 788处,发现矿床3349处,为矿产资源勘查做出了巨大贡献(王学求,2003,2013a,2025;王学求等,2016)。在计划实施过程中,为实现系统采样与分析,通常将研究区划分为不同尺度的标准图幅(如1:20万和1:5万)(谢学锦,2002;谢学锦等,2009)。然而,由于采样单位不同、分析测试时间差异以及受实验室条件变更等因素影响,相邻图幅之间不可避免地存在系统误差,导致地球化学数据在空间上出现连续性受损,即“台阶效应”。这种效应具体表现为元素地球化学场在图幅边界处发生突变,形成非地质成因的浓度异常升高或降低,严重干扰了后续的成矿预测与资源评价(宋承滨,2022;王双等,2023)。

内蒙古白音查干–毛登地区位于大兴安岭南段锡–铜–银多金属成矿带,地质构造演化复杂,经历了多期次构造–岩浆事件叠加,导致区内地球化学背景具有显著的空间异质性。邻图幅间的系统误差强烈的地质背景差异在空间上相互混杂,为多图幅数据整合工作带来了严峻挑战。

针对地球化学数据的调平问题,前人已提出多种方法。经典的衬度返回法(纪宏金等,1993)通过调整子区均值至全区水平来消除误差,该方法计算简便,但隐含了“各子区地球化学背景一致”的假设。在小比例尺或地质背景跨度大的区域,强制拉平平均值往往会导致高背景区的异常被压抑或低背景区的噪声被放大,造成数据失真。此外,数据分幅标准化(陈永清等,1995)、C变换法(纪宏金等,2001)、定和法(时艳香等,2005)及最小二乘法(代永刚等,2005)等虽然各有侧重,但在处理空间异质性强且存在显著地质界线的复杂区域时,效果往往不尽如人意。更为重要的是,地球化学数据本质上属于“成分数据”,受“定和约束”限制。传统统计方法直接应用于原始数据时,易产生“闭合效应”和伪相关(Shaw et al.,1954;Filzmoser et al.,2009),且大多数传统调平方法要求数据服从正态分布,而原始地球化学数据往往呈偏态分布,直接处理可能引入次生误差。

鉴于上述方法存在的局限性,本研究提出一套结

合成成分数据分析与空间调平的综合处理策略。首先引入中心对数比变换(Centered Log-ratio transformation, *clr*)对原始数据进行预处理,旨在打开数据闭合系统,消除伪相关并改善数据正态性,为后续统计分析奠定基础。在此基础上,针对白音查干–毛登地区复杂的地质背景,本文重点研究了边界调平法的适用性,并将其与传统的衬度返回法(基于均值和中位数)进行系统对比。本研究旨在通过定量评估不同方法在消除台阶效应和保持地质背景纹理方面的效果,论证边界调平法在复杂地质背景下处理多图幅地球化学数据的优越性,为区域地球化学大数据的整合与区域找矿预测提供技术支撑。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

大兴安岭南段位于中亚造山带东段(图1),地处华北克拉通北缘与兴蒙造山带的接壤部位,是中国北方最重要的锡–铜–银多金属成矿带之一(姚磊等,2017)。研究区经历了长期且复杂的构造演化历史,地质背景具有显著的多阶段叠加特征。在古生代–三叠纪时期,研究区隶属于古亚洲洋构造演化域,主要受古亚洲洋板块向南俯冲、闭合以及随后的碰撞造山作用控制,奠定了区域构造格架的基础。进入中生代,特别是晚侏罗世–白垩纪时期,该区构造环境发生了重要转换,主要受到古太平洋板块向西俯冲以及北侧蒙古–鄂霍茨克洋俯冲闭合事件的双重构造动力学控制(Ouyang et al.,2015)。

这种多构造体系的复合与叠加作用,不仅使得区内广泛发育北东向与北北东向断裂构造系统,还导致了强烈的岩浆活动与大规模成矿作用,为区域内多金属矿床的形成提供了极为有利的构造–岩浆动力学背景(Chen et al.,2021)。

1.2 研究区地质概况

研究区古生界地层区划属西拉木伦地层区,北部跨入内蒙–兴安地层区中东乌珠穆沁地层分区。下古生界极不发育,受岩体侵蚀和中生代地层的掩盖仅零星出露;上古生界石炭系–二叠系较为发育,是主要的含矿地层。中生界地层区划属于内蒙–松辽地层区中二连地层小区,其中白垩系最为发育,遍及全区,主要由(中)酸性火山岩及火山碎屑岩组成;古近系–新近系位于内蒙地层区–锡林郭勒地层分区,主要为新近系

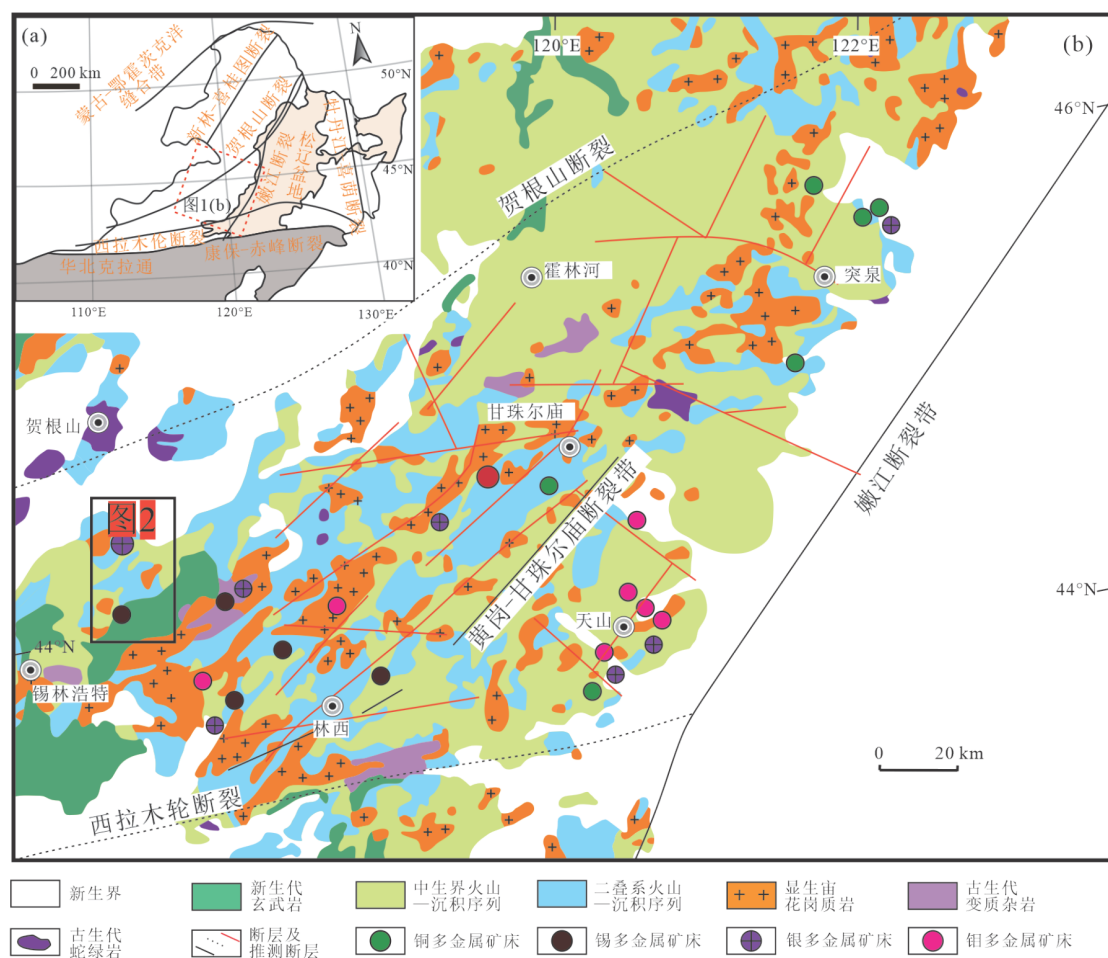


图1 大兴安岭南段大地构造位置图(a)和区域地质及矿产分布图(b)(修改自Ouyang et al., 2015)

Fig.1 Geological sketch tectonic location map (a), and regional geological map with the distribution of deposits (b) of the southern Great Hinggan Mountains (modified after Ouyang et al., 2015)

上新统宝格达乌拉组;第四系分布最广,位于东北地层大区-内蒙古地层区-二连-根河地层分区(图2)。

研究区内构造主要为褶皱和断裂。褶皱主要为海西晚期形成的北东或北东东向复式褶皱;断裂主要是由于区内地层受到海西晚期北西-南东向挤压褶皱的影响,形成了以北东-北东东向为主的逆冲断层。在之后的燕山期,主要为继承和发展海西期的北东向断裂(Zhou et al., 2022; Ouyang et al., 2014)。

随着漫长地史的区域构造运动,本区岩浆活动频繁而强烈。侵入岩具有多期次、多类型、分布广的特点,从北东至南西贯穿于研究区。从岩浆活动年代来看,研究区侵入岩经历了海西期、印支期及燕山期三个构造岩浆活动期(图2)。其中,海西期侵入岩分布广泛,岩性复杂,包括中晚泥盆世石英闪长岩、英云闪长岩及石炭-二叠纪的花岗闪长岩、辉长岩等;印支期侵入岩主要为三叠纪二长花岗岩;燕山期侵入岩则主要包括早白垩世细粒似斑状花岗岩等,该期岩浆活动与区内大规模的锡多金属成矿作用关系密切(Li et al., 2024)。

2 原始数据

2.1 数据来源与分析方法

本研究将研究区分为北部和南部。北部 L50E021011(白音郭勒公社幅)、L50E022011(扎布其尔沃布勒吉幅)、L50E022012(杰林牧场幅)的1:5万土壤地球化学数据由中国地质大学(北京)地质调查院于2009—2013年完成,共采集样品3826件;南部地区 L50E023011(白音诺尔农场幅)、L50E023012(巴拉嘎尔牧场牧业小组幅)、L50E024011(毛登牧场第二生产队幅)由天津地质调查研究中心于2010—2013年完成,共采集样品6924件。土壤地球化学测量工作参照《地球化学普查规范》(1:50000)执行,所有图幅采样密度为8~20点/km²,采样介质为接近基岩面上的残坡积层,采样粒级选择-4~+20目和-100目的混合粒级。共计分析检测14种元素,所有图幅的Pb、Mo、Sn、Cu、Ag、Zn、Cr、Ni、Co元素均使用ES(光谱定量分析法)完成,As、Sb、Bi元素采用AFS(氢化物发生-原子

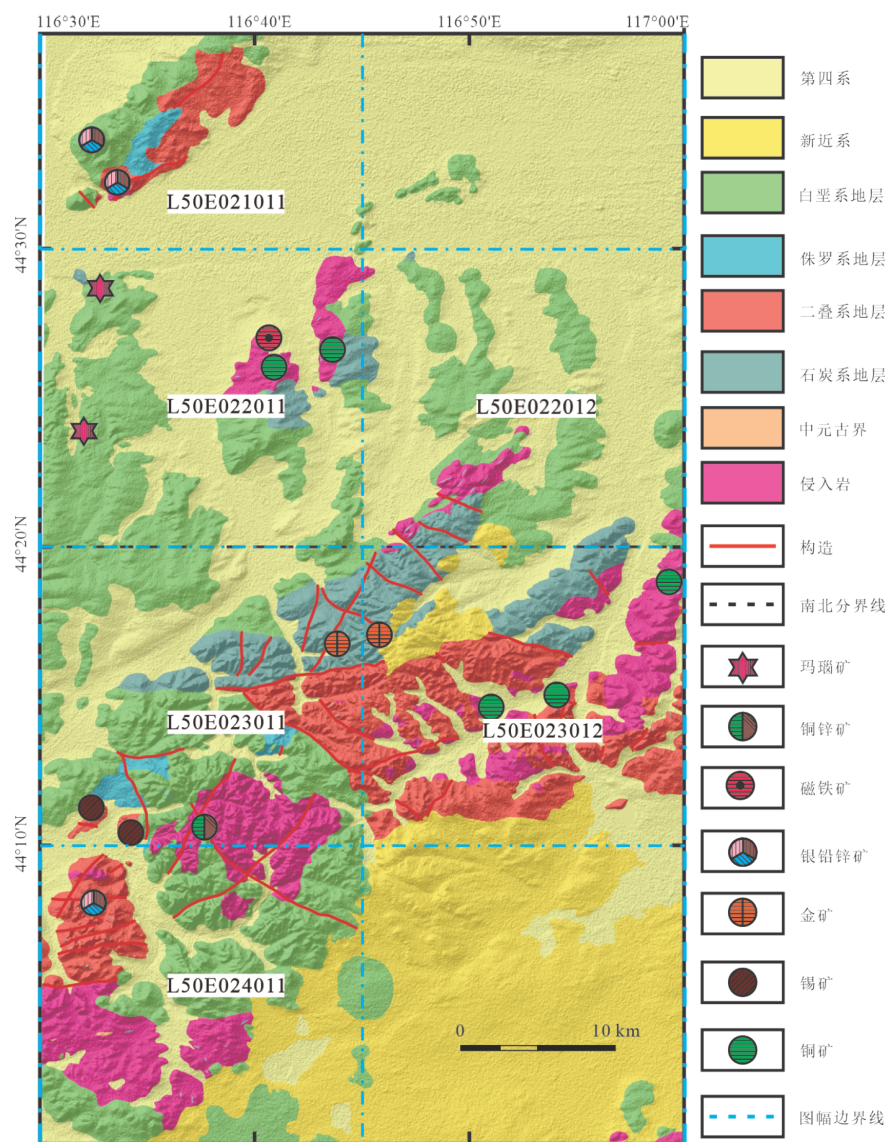


图2 研究区区域地质图(修改自Li et al.,2024)

Fig.2 Regional geological map of the study area(modified from Li et al.,2024)

荧光光谱法)完成,W元素采用POL(极谱法)完成,Au元素采用HES(化学光谱法)完成。整个化探样品测试分析由内蒙古国土资源勘查开发院实验室完成,所有样品内检合格率均大于93%。

2.2 原始数据特征分析

为揭示南、北图幅间的数据差异,本研究首先对原始数据进行了探索性统计分析(表1)。结果显示,除Sb元素外,北部数据的最小值普遍高于南部,而最大值却低于南部。结合箱型图(图3)可见,该图展示了研究区全部14种元素的原始数据分布特征。从整体形态上看,北部各元素的箱体较短,数据分布相对集中,反映出背景相对均一;而南部各元素(特别是Au、Cu和Ag等成矿指示元素)的箱体普遍较长,离散程度更高,且存在明显的高值离群点。这种显著的分布形态差

异,与研究区区域地质图(图2)所揭示的地质背景特征高度吻合:北部主要为沉积地层,地质构造相对简单;而南部岩浆活动频繁,多期次构造-岩浆事件的叠加导致了极强的数据离散性和地质背景非均一性,这正是成矿作用在地球化学数据上的直接响应。

从统计分布来看,所有元素的偏度均远离0,峰度均远离3,表现出显著的右偏和尖峰特征(表1),表明原始数据不服从正态分布(Witte and Witte, 2009)。由于传统统计分析对数据正态性有较高要求,直接使用原始数据可能导致偏差(Filzmoser et al., 2009),因此有必要在分析前对数据进行预处理。

此外,变异系数反映了元素在空间分布上的不均匀程度及分异特征,常被用来衡量找矿潜力(表1)。对比发现,南部地区成矿指示元素(特别是Au、Cu、Ag)的变异

表 1 原始数据统计特征表
Table 1 Statistical characteristics of the original data

元素	地区	数量	最小值	25%	50%	75%	最大值	标准差	平均值	峰度	偏度	变异系数
Au	北部	3826	0.98	1.30	1.50	1.60	35.20	0.78	1.52	1197.53	31.89	0.51
	南部	6924	0.02	0.29	0.56	0.97	80.45	1.95	0.88	537.22	17.99	2.22
Ag	北部	3826	0.06	0.08	0.08	0.10	10.00	0.27	0.11	764.08	25.76	2.45
	南部	6924	0.01	0.05	0.07	0.09	10.00	0.39	0.10	440.13	19.67	3.90
Cu	北部	3826	8.00	11.60	13.70	18.40	1000.00	24.02	17.47	1098.73	30.01	1.37
	南部	6924	1.68	15.46	20.68	24.26	22 510.00	355.92	29.70	3276.66	56.01	11.98
Pb	北部	3826	7.70	13.80	16.30	19.10	669.90	20.53	18.38	422.47	18.34	1.12
	南部	6924	1.33	17.38	19.43	21.94	1261.00	31.60	21.93	613.49	21.58	1.44
Zn	北部	3826	39.60	44.50	48.90	60.40	1000.00	51.97	61.41	112.64	8.90	0.85
	南部	6924	2.37	46.92	55.98	65.35	5230.00	122.35	68.28	683.06	21.94	1.79
W	北部	3826	0.80	0.95	1.33	1.71	113.40	4.01	1.93	287.51	14.57	2.08
	南部	6924	0.17	1.23	1.49	1.75	207.80	4.62	1.92	1042.99	28.39	2.41
Sn	北部	3826	1.70	1.98	2.31	3.02	100.00	5.65	3.48	151.01	10.60	1.62
	南部	6924	0.03	2.32	2.87	4.25	200.00	11.33	4.61	177.67	12.27	2.46
Mo	北部	3826	0.62	0.82	0.93	0.98	10.60	0.46	1.02	99.20	7.58	0.45
	南部	6924	0.07	0.66	0.79	1.00	382.70	4.82	1.03	5676.49	72.44	4.68
As	北部	3826	1.00	5.20	7.20	9.50	1912.60	52.47	12.02	662.99	23.44	4.37
	南部	6924	0.84	5.95	8.89	10.88	517.94	27.71	12.87	151.28	10.95	2.15
Bi	北部	3826	0.08	0.10	0.13	0.18	25.74	0.50	0.19	1796.20	38.05	2.63
	南部	6924	0.02	0.17	0.25	0.30	584.60	8.06	0.59	4031.47	58.09	13.66
Cr	北部	3826	17.42	27.37	38.33	49.82	568.00	25.80	42.54	90.28	6.98	0.61
	南部	6924	1.27	16.23	44.00	54.38	1882.00	60.34	43.86	527.86	19.80	1.38
Ni	北部	3826	8.30	14.70	19.30	24.60	473.30	15.64	21.99	206.42	9.98	0.71
	南部	6924	0.52	6.59	20.00	26.10	2623.00	38.56	19.98	3055.63	48.04	1.93
Co	北部	3826	4.00	6.90	9.00	11.50	80.10	4.94	10.02	27.94	3.80	0.49
	南部	6924	0.44	3.36	8.65	11.13	101.10	6.29	8.56	21.47	2.90	0.73
Sb	北部	3826	0.10	0.37	0.49	0.65	946.60	19.87	1.70	1480.40	35.13	11.69
	南部	6924	0.13	0.73	1.03	1.24	150.50	3.71	1.60	486.70	17.07	2.32

注: Au元素含量为质量分数($\times 10^{-9}$), 其余元素含量为质量分数($\times 10^{-6}$)。

系数呈数量级地高于北部地区。以Au元素为例,其在南部的变异系数高达17.99,而北部仅为0.51。这一显著差异与区域地质背景高度对应:南部地区构造-岩浆活动强烈,石炭系-二叠系含矿地层发育,已知矿床多集中于此,因此其地球化学场表现出极强的非均一性;而北部地区地质背景相对简单均一。这说明原始数据虽然在空间上存在图幅间的系统误差,但在统计特征上仍能如实反映该区南北地质背景与成矿潜力的本质差异。

3 方法与技术

3.1 成分数据变换

地球化学数据受到“定和约束”(Sum-constraint)的影响,属于典型的成分数据,直接分析易产生闭合效

应和伪相关问题(Filzmoser et al., 2009)。为消除这一影响,还原数据的真实相关性,需采用对数比变换将数据映射至欧氏空间(Aitchison et al., 2002)。目前常用的变换方法主要包括加法对数比变换(alr)、等距对数比变换(ilr)和中心对数比变换(clr)。其中,alr变换的结果依赖于分母的选择,具有不唯一性;ilr变换虽然克服了共线性问题,但其产生的新变量由多个成分复合而成,缺乏直观的地质意义,难以解释。相比之下,clr变换虽然在协方差估计上存在共线性限制,但它不仅有效消除了闭合效应,且变换后的数据与原始元素保持一一对应关系,具有优良的可解释性(Zuo et al., 2020)。鉴于本研究侧重于地球化学异常的识别与地质解释,故选用clr方法对数据进行预处理,相关计算

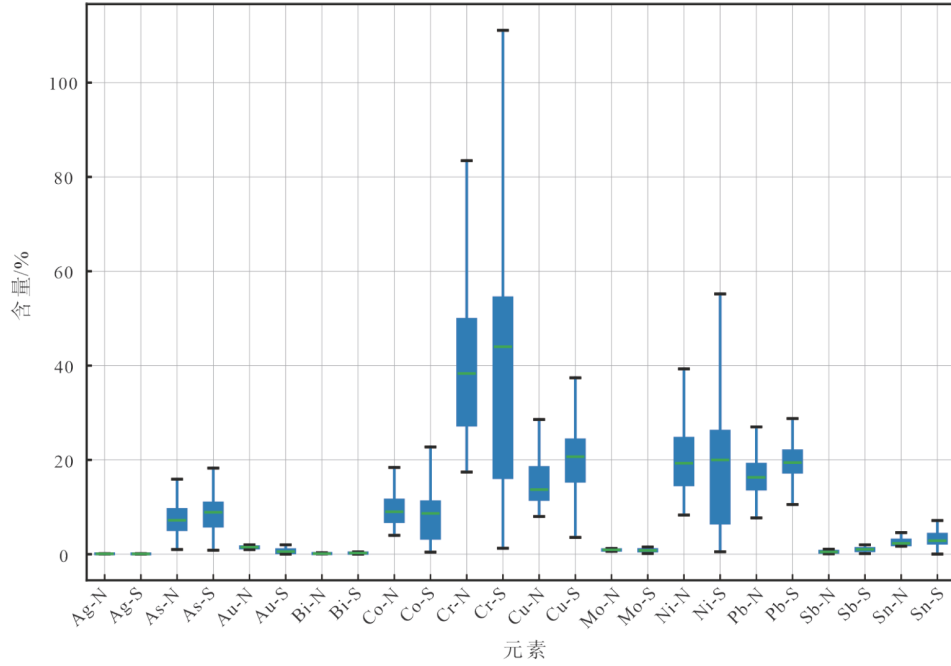


图3 原始数据的箱型图

Fig.3 Box plot of the raw data

利用CoDaPack软件完成。

3.2 数据调平方法

3.2.1 衬度返回法 衬度返回法的核心思想是将存在系统误差的图幅均值视为该区块的背景值,通过数学变换将不同图幅的均值校正至同一水平(通常为全区均值水平),从而实现不同数据组之间的可对比性。基于校正后数据绘制的地球化学等值线图能更合理地反映地质特征(赵玉岩等,2018)。其计算公式如下:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij}}{\bar{X}_{ij}} \times \bar{X}_q \quad (1)$$

$$\bar{X}_{ij} = \sum X_{ij} / n_j \quad (2)$$

$$\bar{X}_q = \sum X_q / n \quad (3)$$

式中, X'_{ij} 是 j 区块中第 i 个样品的校正值, X_{ij} 是 j 区块中第 i 个样品的原始分析数据; n_j 是 j 区块内的样品总数, $\bar{X}_{ij}$ 是 j 区块中 i 元素的所有样品分析测试数据的均值; n 是全区内的样品总数, X_q $\bar{X}_q$ 是全区所有区块某一元素的分析测试数据的均值。

衬度返回法的基本原理是基于均值进行区域调平。此外,考虑到均值易受极值影响,部分学者提出了稳定性更强的基于中位数的衬度返回法(刘强等,2014),即用中位数替代上述公式中的均值参数进行计算。

3.2.2 基于边界的调平和边界调平法原理 衬度返回法虽具有计算简便和易于实现的优势,但其局限性

也十分明显,即该方法将单一图幅视为地质背景均一的整体进行“一刀切”式的校正。在研究区面积较小、跨越地质单元较少且地质条件变化不大的情况下,该假设是合理的。然而,对于大面积或地质背景复杂的区域,这种忽略局部差异的处理方式容易导致数据严重“失真”。针对这一问题,本研究引入Bahram(1998)提出的边界调平法,结合成分数据变换技术对数据进行校正。

该方法基于“边界连续性假设”,即在相邻图幅的交界处(图4中的a区和b区),若未发生测量误差,理论上其地质条件相似,地球化学数据特征应保持连续一致。若出现显著差异,则可判定为系统误差。该方法通过筛选边界两侧地质条件一致的样品,计算其分位

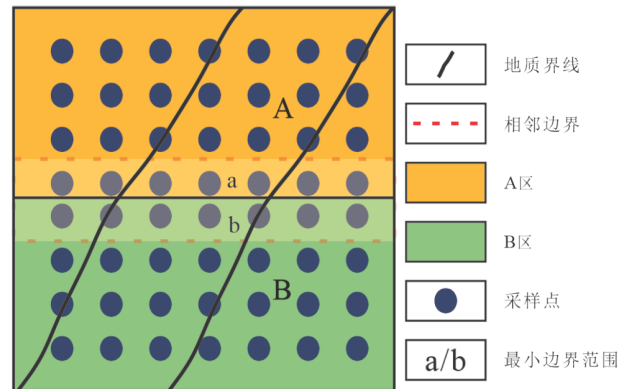


图4 边界调平法示意图

Fig.4 Schematic diagram of the boundary leveling method

数,并在散点图中进行线性拟合。利用拟合曲线参数将待校正图幅边界的数据调整至相邻参考图幅的水平,并以此参数推广至整个图幅。

在实际操作中,临界范围(边界带宽)的确定尤为关键。范围过小可能导致样本量不足,缺乏代表性;范围过大则可能引入异质地体,违背地质一致性假设。因此,边界大小的确定需要在保证样本充足性(代表性)和地质背景一致性之间寻求平衡。为了避免人为划定的主观性,本研究采用基于数据统计特征的定量化方法,通过计算不同边界带宽下的数据分布差异度来优选最佳边界距离。此外,该方法基于多元统计学原理,要求数据尽可能满足正态分布,故需在成分数据变换(*clr*)的基础上进行。

最小边界距离的确定:确定最佳边界距离(带宽)是边界调平法的关键步骤。本文通过计算不同带宽下的差异度量值(*D*值)来优选最佳带宽。*D*值的计算公式如下:

$$D = \sum w_i [(q_i)_e - (q_i)_e']^2 \quad (4)$$

式中,*D*表示两组数据(北部和南部)在特定带宽下的差异度量; w_i 为分配给第*i*个分位数的权重——如图5所示,如数据满足正态分布,则50分位数的概率密度为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \approx 0.39$ (Witte and Witte, 2009; Bahram et al., 1998),将50分位数的概率密度(0.39)作为标准权重,设为1,其余分位数的权重通过与50分位数概率密度的

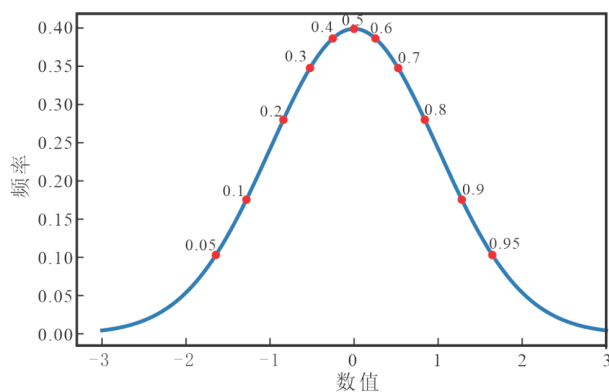


图5 不同分位数的概率密度图

Fig.5 Probability density plot of different quantiles

比例进行缩放; $(q_i)_e$ 在北部带宽*e*中的第*i*个分位数; $(q_i)_{e'}$ 在南部带宽*e'*中的第*i*个分位数。

4 结果与讨论

4.1 原始数据结果

前文的探索性分析表明,研究区原始地球化学数据存在显著的非地质成因系统误差。为直观展示这一问题并作为后续调平效果的对比基准,本文以Au元素为例,利用原始数据绘制地球化学图(图6a),展示其受测量系统误差影响所出现的显著“台阶效应”。鉴于原始数据不服从正态分布,常规的“均值+标准差”法不适用于异常下限的确定,故本文采用累积频率法,选取5%、15%、25%、40%、60%、75%、85%、95%和100%等

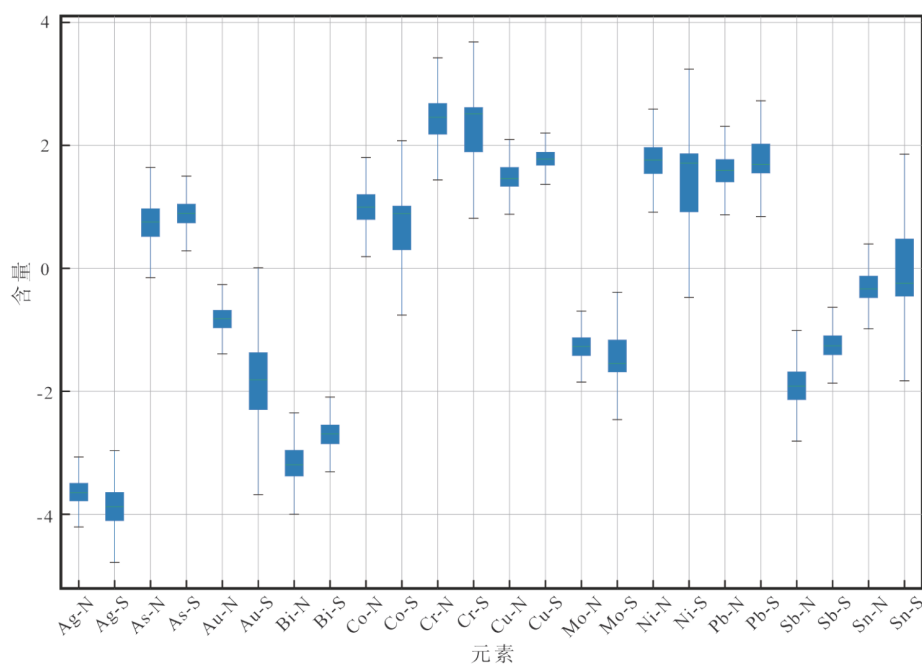


图6 几种方法调平之后的Au元素地球化学图

Fig.6 Geochemical maps of Au element after the data were processed using several leveling methods

分位点作为分级界线,并利用反距离权重法(IDW)进行空间插值。

结合表1和图6a可见,Au元素表现出强烈的“台阶效应”:北部图幅的背景值显著偏高,其均值和中位数约为南部图幅的2~3倍。这种沿图幅边界分布的高低值突变,显然与该地区跨越构造单元的地质背景特征不符,而是主要归因于不同采样批次或测试分析条件引入的系统误差。因此,必须对该数据进行有效的调平处理。

4.2 成分数据变换结果

在本研究中,成分数据变换(*clr*变换)对数据分布特征产生了显著改善。首先,经过*clr*变换后,数据的峰度和偏度值得到显著修正,整体分布更接近正态分布。表2和表3显示,经过*clr*变换后,南北地区大部分

元素的平均值趋于一致,峰度和偏度的数值也发生了明显变化。例如,Au元素在北部的偏度从31.89降至-1.05,峰度从1197.53降至16.03,改善率分别达到96.7%和98.66%;而南部数据的偏度从17.99降至0.28,峰度从537.22降至1.71,改善率为99.68%和98.44%。这些变化表明,*clr*变换有效地减小了数据的偏态和极端值,使得数据分布更加均匀,接近正态分布。

经过*clr*变换后,Ag元素的数据分布特征也有显著改善。北部的峰度从764.08降至15.79,改善率为97.93%,尽管依然存在较高的峰度,仍显示出数据的分布有所改善。南部的Ag峰度从440.13降至6.01,改善率为98.63%,虽然峰度高于正态分布的标准值3,但相比于未变换数据,已大幅度降低。这表明*clr*变换能够显著减少元素的偏态分布和极端值,尽管部分元素

表 2 *clr*变换之后的统计分析
Table 2 Statistical analyses after the *clr* transformation

元素	地区	数量	最小值	25%	50%	75%	最大值	标准差	平均值	峰度	偏度
Au	北部	3826	-3.99	-1.00	-0.85	-0.71	1.59	0.27	-0.87	16.03	-1.05
	南部	6924	-4.75	-2.38	-1.88	-1.42	2.55	0.77	-1.91	1.71	0.28
Ag	北部	3826	-4.93	-3.92	-3.79	-3.63	-0.32	0.32	-3.76	15.79	2.29
	南部	6924	-6.81	-4.26	-4.02	-3.78	0.22	0.53	-4.01	6.01	0.66
Cu	北部	3826	0.04	1.39	1.52	1.70	4.12	0.37	1.57	4.92	1.06
	南部	6924	0.28	1.74	1.85	1.96	6.17	0.28	1.86	22.82	2.14
Pb	北部	3826	0.06	1.46	1.66	1.84	3.72	0.33	1.64	2.86	0.23
	南部	6924	-1.20	1.61	1.75	2.10	4.83	0.51	1.82	2.87	-0.10
Zn	北部	3826	1.30	2.71	2.84	2.99	5.27	0.32	2.89	6.84	1.66
	南部	6924	1.03	2.71	2.81	3.16	5.35	0.39	2.93	3.47	1.01
W	北部	3826	-2.11	-1.21	-0.96	-0.71	2.75	0.50	-0.90	9.42	2.21
	南部	6924	-2.47	-1.03	-0.93	-0.65	3.15	0.41	-0.81	5.39	1.47
Sn	北部	3826	-1.70	-0.49	-0.35	-0.13	2.60	0.46	-0.24	7.26	2.21
	南部	6924	-4.10	-0.47	-0.25	0.49	3.73	0.67	-0.04	1.55	0.73
Mo	北部	3826	-4.07	-1.47	-1.32	-1.17	0.77	0.31	-1.31	7.42	0.11
	南部	6924	-3.99	-1.75	-1.61	-1.21	3.54	0.60	-1.45	1.01	0.64
As	北部	3826	-1.47	0.54	0.78	1.00	5.10	0.57	0.80	5.68	1.08
	南部	6924	-2.27	0.77	0.93	1.08	5.03	0.51	0.98	6.18	1.47
Bi	北部	3826	-5.48	-3.51	-3.31	-3.07	-0.38	0.42	-3.27	6.48	1.46
	南部	6924	-5.03	-2.96	-2.79	-2.65	3.24	0.59	-2.77	12.97	1.94
Cr	北部	3826	-0.30	2.27	2.55	2.78	5.08	0.43	2.51	2.26	-0.26
	南部	6924	-0.90	1.97	2.61	2.71	6.54	0.60	2.39	3.48	-0.43
Ni	北部	3826	-0.82	1.60	1.83	2.04	4.64	0.40	1.82	3.96	0.21
	南部	6924	-1.58	0.96	1.78	1.93	5.46	0.67	1.52	1.10	-0.51
Co	北部	3826	-2.16	0.83	1.03	1.25	3.05	0.38	1.03	5.27	-0.46
	南部	6924	-3.00	0.31	0.92	1.05	3.41	0.62	0.70	1.47	-0.67
Sb	北部	3826	-3.65	-2.22	-1.99	-1.75	3.89	0.65	-1.92	12.33	2.55
	南部	6924	-2.97	-1.46	-1.31	-1.14	2.67	0.59	-1.23	5.19	1.65

表3 clr变换前后峰度和偏度的变化统计

Table 3 Statistics of changes in Kurtosis and Skewness before and after the clr transformation

元素	地区	数量	变换前峰度	变换前偏度	变换后峰度	变换后偏度	峰度改善率	偏度改善率
Au	北部	3826	1197.53	31.89	16.03	−1.05	98.66%	103.29%
	南部	6924	537.22	17.99	1.71	0.28	99.68%	98.44%
Ag	北部	3826	764.08	25.76	15.79	2.29	97.93%	91.11%
	南部	6924	440.13	19.67	6.01	0.66	98.63%	96.64%
Cu	北部	3826	1098.73	30.01	4.92	1.06	99.55%	96.47%
	南部	6924	3276.66	56.01	22.82	2.14	99.30%	96.18%
Pb	北部	3826	422.47	18.34	2.86	0.23	99.32%	98.75%
	南部	6924	613.49	21.58	2.87	−0.10	99.53%	100.46%
Zn	北部	3826	112.64	8.90	6.84	1.66	93.93%	81.35%
	南部	6924	683.06	21.94	3.47	1.01	99.49%	95.40%
W	北部	3826	287.51	14.57	9.42	2.21	96.72%	84.83%
	南部	6924	1042.99	28.39	5.39	1.47	99.48%	94.82%
Sn	北部	3826	151.01	10.60	7.26	2.21	95.19%	79.15%
	南部	6924	177.67	12.27	1.55	0.73	99.13%	94.05%
Mo	北部	3826	99.20	7.58	7.42	0.11	92.52%	98.55%
	南部	6924	5676.49	72.44	1.01	0.64	99.98%	99.12%
As	北部	3826	662.99	23.44	5.68	1.08	99.14%	95.39%
	南部	6924	151.28	10.95	6.18	1.47	95.91%	86.58%
Bi	北部	3826	1796.20	38.05	6.48	1.46	99.64%	96.16%
	南部	6924	4031.47	58.09	12.97	1.94	99.68%	96.66%
Cr	北部	3826	90.28	6.98	2.26	−0.26	97.50%	103.72%
	南部	6924	527.86	19.80	3.48	−0.43	99.34%	102.17%
Ni	北部	3826	206.42	9.98	3.96	0.21	98.08%	97.90%
	南部	6924	3055.63	48.04	1.10	−0.51	99.96%	101.06%
Co	北部	3826	27.94	3.80	5.27	−0.46	81.14%	112.11%
	南部	6924	21.47	2.90	1.47	−0.67	93.15%	123.10%
Sb	北部	3826	1480.40	35.13	12.33	2.55	99.17%	92.74%
	南部	6924	486.70	17.07	5.19	1.65	98.93%	90.33%

仍有较大的峰度,但与原始数据相比,已经是一个较为理想的改善结果。

尽管clr变换有效改善了大多数元素的分布,但Au、Sn、Ni、Co元素在南部地区的数据仍表现出一定程度的分散性。对比箱型图(图3、7)可知,clr变换虽然在很大程度上压缩了极值对整体分布的影响,但并未改变各元素在空间上的相对变化趋势。这表明clr变换在优化数据结构、消除伪相关的同时,并未改变数据的地球化学属性,完整保留了由复杂地质背景和矿化作用引起的原始地球化学异常信息,证明了变换结果的真实性与可靠性。

尽管如此,相较于原始数据,clr变换后的数据改善明显,且具有更高的可比性和分析价值。地球化学数据通常呈现正态或对数正态分布特征,clr变换可有

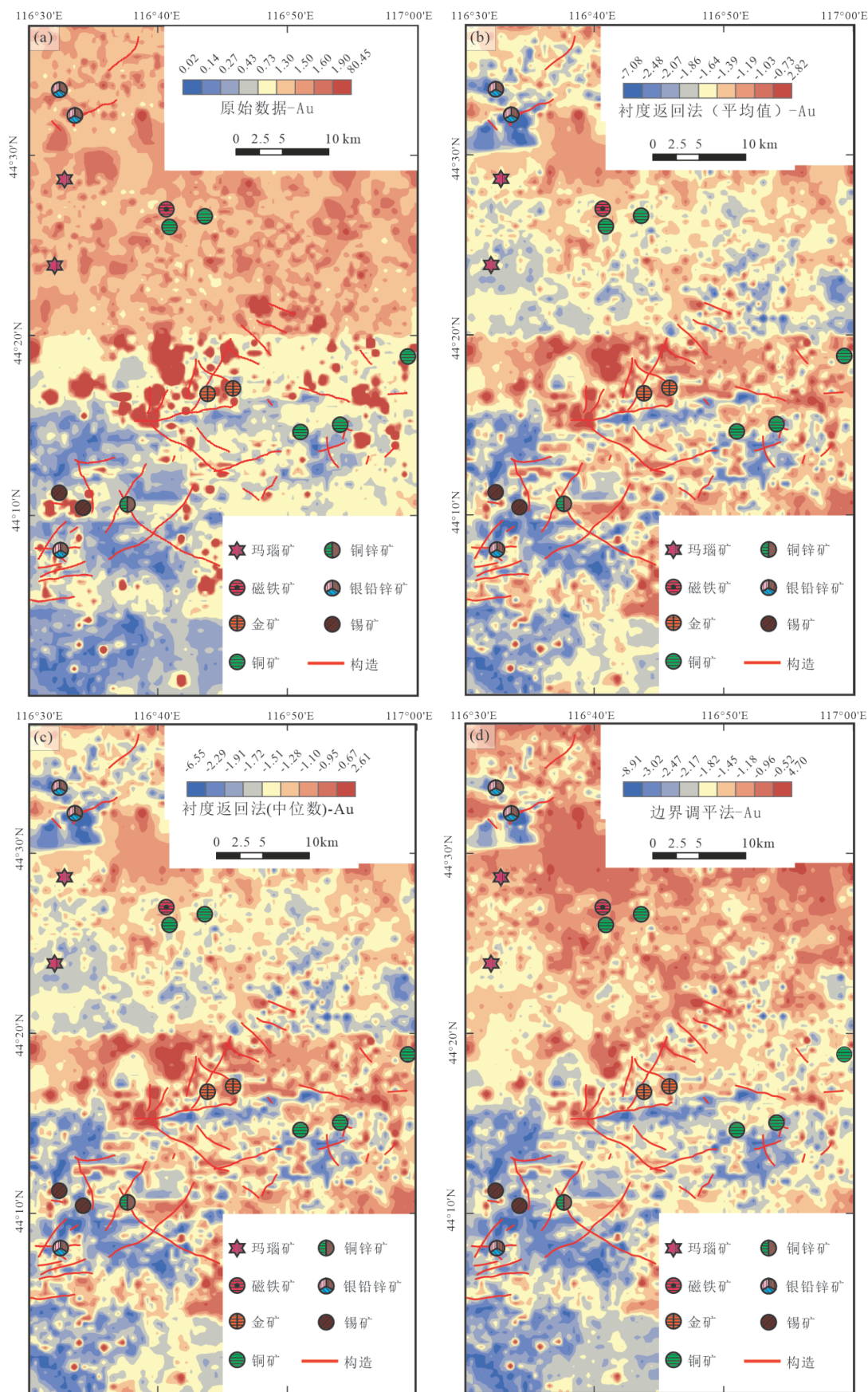
效地使数据更加符合这些分布特征。即使部分元素在clr变换后仍存在一定程度的分散和高值异常点,整体上clr变换极大地提升了数据的质量,减小了数据的偏态和极端值,使其更加适用于后续的统计分析和地质模型构建。

综上所述,clr变换不仅改善了大多数元素的数据分布,而且大幅减少了偏态和极端值的影响。尽管存在某些数据分散问题,这些问题相较于原始数据已得到了显著缓解。因此,后续分析将基于这些变换后的数据进行,为地球化学数据分析、矿产资源预测以及地质模型的构建提供更加准确和稳定的基础。

4.3 调平结果

4.3.1 衬度返回的结果

在进行成分数据分析的基础上,对南北地区进行基于衬度返回法的数据调平。

图7 *clr*变换后数据的箱型图Fig.7 Box plot of processed data after the *clr* transformation

衬度返回法的基本原理是根据图幅之间的平均值进行整体的数据调平。此外,有学者通过利用中位数的稳定性,用中位数来替代平均值进行衬度返回(刘强等, 2014),从表2可以看出,经过 clr 变换之后各元素的中位数与平均值表现大部分一致,仅有个别元素存在较大差异,如Sn元素的中位数为 $(-0.35/-0.25)$,平均值为 $(-0.24/-0.04)$ 、Au元素的中位数为 $(-0.85/-1.88)$,平均值为 $(-0.87/-1.91)$ 。这是由于这两种元素中存在个别极大值,拉高了平均值,因此平均值可能稳定性更差。为了对比平均值和中位数的效果,下文使用两种参数分别进行调平。

基于平均值的调平:通过计算北部、南部以及全区的统计参数,利用衬度返回法,使用平均值作为调平参数,得到调平后的南北地区各元素参数如表4。从表4可以看出,经过衬度返回法之后,南北两地区Au元素的平均值已经处于同一水准,可以理解为将均值大的区域统一缩小,均值小的区域放大。但是没有改变数据的分布结构,因此所有元素的峰度、偏度并没有发生改变,依然与表2中经过 clr 变换后的数据保持一致,这表示经衬度返回法处理之后的数据仍然基本服从正态分布,可以进行多元统计分析。对比Au元素的百分位数可以发现,南北地区大部分元素的25%、50%和75%值都比较接近,但最大值和最小值的差别较大。

同样将经过衬度返回法调平之后的数据通过累频法计算分带值,使用IDW插值得到Au元素地球化学图(图6b)。从图6b可以看出,经过衬度返回之后,原本在原始数据中Au元素的台阶效应已经得到改善,大范围的背景差异被消除,但是仍然存在边界处有明显台阶。

基于中位数的调平:数据中的极端值或离群值对中位数影响较小,因此具有较强的稳定性,而平均值对离群值非常敏感,在数据中有显著偏离的极端值时,可能无法准确反映数据的整体趋势。因此为了与平均值效果做对比,本文选取了更具有稳定性的中位数来做衬度返回。

通过计算北部、南部以及全区的统计参数,使用中位数作衬度返回法,得到调平后的南北地区Au元素参数如表4所示。通过中位数的衬度返回法变换,Au元素的百分位数已经比较接近,同时所有元素的峰度、偏度也并未发生改变。此外,最小值之间的差距与基于平均值的结果有所改善。结合Au元素的地球化学图(图6c),基于中位数的调平效果相较于基于均值的调平(图6b)没有明显变化。究其原因,并非单纯受限于Au元素含量低或测量误差,而是因为本文在调平前对数据进行了 clr 变换预处理。 clr 变换有效地优化了原始数据的偏态结构,显著抑制了极值对数据分布的影响,使得变换后的数据趋向于正态分布(表2),从而导致各区块的均值与中位数在数值上高度逼近。因此,基于这两种参数计算出的衬度系数差异极小,最终呈现出的调平效果也趋于一致。

4.3.2 基于边界的调平结果 理论上越接近分界线的数据应该越相似,因此可以尽量选择靠近边界线的数据,但同时需要考虑到数据的可统计性,数据过少可能无法展示真实的分布特征,数据过多可能脱离了相似背景。因此通过选取南北边界线500~5000 m,以500 m作为范围递增,分别计算南北地区不同边界范围的分位数,最后以差异度量(D 值)做折线图来衡量不同边界范围的分位数差异程度(图8)。

从图8可以看出,在1000 m的时候南北地区的数据的差异性最低,即相似度最高,因此选取该范围内的数据作为边界调平数。在基于边界的调平过程中,需要拟定某一块区为“标准区”,然后通过百分位数确定的拟合函数将另一块区的数据以“标准区”为标准进行调平。由于研究区所有图幅均严格参照同一规范进行采样与分析,数据质量真实可靠,理论上选取任一侧作为基准进行相对校正皆可。考虑到南部地区地质背景复杂且已知矿床集中(图1),为保持主要成矿区原始地球化学数据的数值恒定,便于后续开展成矿规律研究,本研究选取南部地区作为标准区,将北部数据进行调整。

表 4 几种方法调平之后Au元素参数表

Table 4 A table for parameters of Au element after the data leveling process using several leveling methods

调平方法	地区	最小值	25%	50%	75%	最大值	标准差	平均值	峰度	偏度
衬度返回法 (均值)	北部	-7.08	-1.78	-1.51	-1.26	2.82	0.48	-1.54	16.03	-1.05
	南部	-3.82	-1.92	-1.52	-1.15	2.06	0.62	-1.54	1.71	0.28
衬度返回法 (中位数)	北部	-6.55	-1.65	-1.40	-1.16	2.61	0.44	-1.42	16.03	-1.05
	南部	-3.52	-1.77	-1.40	-1.06	1.89	0.57	-1.41	1.71	0.28
边界调平法	北部	-8.91	-1.62	-1.25	-0.90	4.70	0.66	-1.28	16.03	-1.05
	南部	-4.75	-2.38	-1.88	-1.42	2.55	0.77	-1.91	1.71	0.28

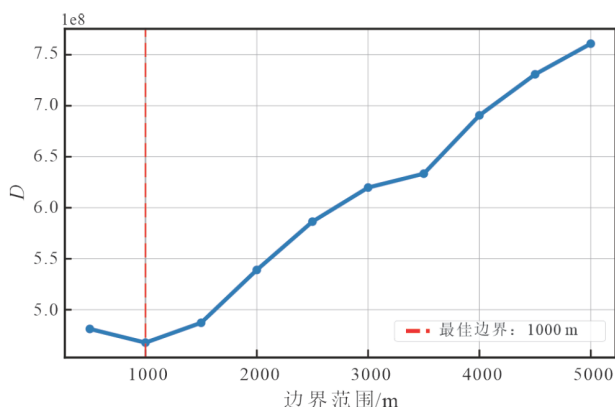


图8 最佳边界范围确定折线图

Fig.8 A line chart for determining the optimal boundary range

调平参数由边界1000 m内的数据取百分位数拟合得到,拟合信息见图9。其中明显能看出Au元素在理论上在边界线附近应该为接近 $X=Y$ 的分布曲线,但是却相差甚远,值得重视。同时,Au元素的 R^2 显示出该元素在南北地区的拟合情况都较好(0.96),表明南北地区Au元素数据是呈现线性相关的,认为可以通过基于边界的方式进行调平。

将通过边界确定的调平参数推广至区域,以南部地区数据为基准,进行调平北部地区的数据,并分区统计调平之后的数据参数如表4所示。同样将基于边界调平法调平之后的数据进行IDW插值,结果如图6d所示。

从调平后的Au元素地球化学图(图6d)可以看出,边界调平法取得了理想的效果。首先,图幅边界处的“台阶效应”已被彻底消除,南北数据在空间上实现了自然、平滑的过渡,肉眼已无法辨识原有的人为分界线;其次,已知矿点与异常中心的对应关系良好,南部主要金矿床(点)附近的Au元素高值浓集中心得到了

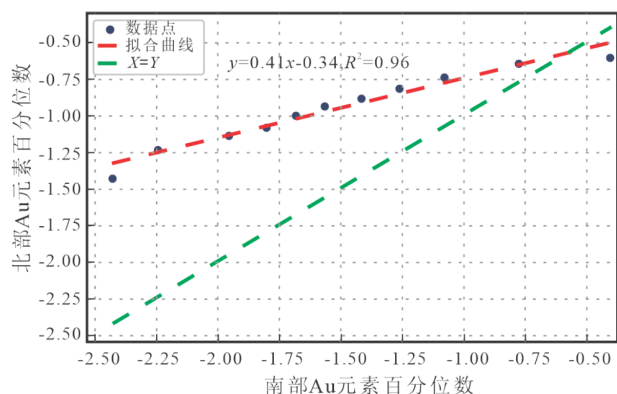


图9 Au元素南北1000 m范围内的拟合曲线

Fig.9 A fitted curve for the variation of Au element within the 1000 m range of the North-South belt

完整保留,未因调平计算而发生位移或幅值压抑;最后,调平后的整体地球化学场特征与区域地质背景高度吻合,北部呈现出受沉积地层控制的大面积连续背景异常,而南部则显示出受构造-岩浆活动控制的“背景相对较低、局部矿化突出”的特征。这表明该方法在有效校正系统误差的同时,最大限度地还原了真实的地球化学场分布规律。

4.4 调平方法适用性探讨

在前期的调研过程中,已有学者提出了多种调平方法,针对不同数据特征需要选择合适的方法。衬度返回法作为应用最广泛的调平方法,适用于大部分数据的调平,但仍然存在一定的局限性。首先,在小比例尺图幅中,由于图幅范围过大,通常会跨越不同的地质体和地球化学景观区,使用单一图幅进行调平时可能会引入较大的误差;其次,关于衬度返回法中统计参数的选择问题,本研究发现基于均值和基于中位数的调平效果并无显著差异。这主要是因为数据在经过 clr 变换后,偏态分布特征得到了显著改善,极值对统计特征的影响被大幅削弱,致使图幅均值与中位数在数值上高度逼近。这一结果表明,在有效的数据预处理下,参数选择已非关键制约因素,但衬度返回法本身基于“全区背景均一”的假设,决定了其无法从根本上消除本区因地质背景强烈差异所导致的复杂台阶效应。

边界调平法则基于地质体连续性假设,能够有效消除元素的台阶效应,且适用于不同尺度之间的调平。然而,该方法的效果依赖于边界地质条件的一致性,需要确保选取合适的边界范围,才能实现更好的调平效果。此外,笔者认为,尽管边界调平法对于大比例尺图幅表现出更好的效果,但在小比例尺图幅中,若满足边界地质条件一致性,也能达到较好的调平效果,其可靠性应优于衬度返回法。

5 结论

(1)揭示了传统方法在复杂地质背景区的局限性。研究表明,在跨越不同构造单元、地质背景差异显著的区域,基于“全区背景一致”假设的衬度返回法(均值/中位数)能在一定程度上调整图幅间的背景差异,但难以彻底消除边界处的“台阶效应”。

(2)验证了边界调平法处理强空间异质性数据的优越性。利用相邻图幅边界的地质连续性构建局部校正模型,边界调平法在完全消除“台阶效应”的同时,完整保留了与燕山期岩浆活动及已知矿化密切相关的地球化学异常细节(如Au元素),未出现数据失真。

(3)提出了“成分数据变换(clr)+边界调平”的组合校正策略。该流程克服了原始数据闭合效应和传统

统计调平的局限性,为解决大比例尺、高异质性区域的多图幅地球化学数据整合提供了更具针对性和有效性的技术方案。

作者贡献声明: 唐瑞, 论文构思和写作, 数据分析、研究方法; 李程, 论文构思和修改、数据分析、研究方法; 唐瑞, 参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图; 肖克炎, 参与论文构思、数据分析、研究方法和论文写作与修改。所有作者均阅读并同意最终稿件。

利益冲突声明: 所有作者声明本研究无任何利益冲突。

参考文献 (References):

- Aitchison J, Greenacre M. 2002. Biplots of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 51(4): 375–392
- Bahram D, Eion C. 1998. Leveling Geochemical Data between Map Sheets. *Journal of Geochemical Exploration*, 63: 189–201
- Chen G Z, Wu G, Li T G, Liu R L, Li R H, Li Y L, Yang F. 2021. Mineralization of the Daolundaba Cu-Sn-W-Ag deposit in the southern Great Xing'an Range, China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotope. *Ore Geology Reviews*, 133: 104117
- 陈建国, 郭晓兰, 刘春华. 1997. 区域地球化学图件拼接中的图幅平差法. *地球科学*, 22(6): 619–626 [Chen J G, Guo X L, Liu C H. 1997. Map adjustment method for merging geochemical map. *Earth Science*, 22(6): 619–626 (in Chinese with English abstract)]
- 陈永清, 纪宏金. 1995. 标准化区域地球化学图的编制方法及应用效果. *长春地质学院学报*, 25(2): 216–221 [Chen Y Q, Ji H J. 1995. The compiling method of standardized geochemical map and its application effects. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 25(2): 216–221 (in Chinese with English abstract)]
- 代永刚, 郝立波, 陆继龙. 2005. 区域化探中多图幅系统误差的校正. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(1): 128–130 [Dai Y G, Hao L B, Lu J L. 2005. The systemic error correction of maps in regional geochemical prospecting. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(1): 128–130 (in Chinese with English abstract)]
- Filzmoser P, Hron K, Reimann C. 2009. Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20(6): 621–632
- Li C, Xiao K Y, Sun L, Tang R, Dong X C, Qiao B C, Xu D H. 2024. CNN-Transformers for mineral prospectivity mapping in the Maodeng-Baiyinchagan area, Southern Great Xing'an Range. *Ore Geology Reviews*, 167: 106007
- 纪宏金, 连长云, 杜庆丰. 1993. 地球化学数据的标准化与衬度变换. *物探化探计算技术*, (1): 19–25 [Ji H J, Lian C Y, Du Q F. 1993. Standardization and contrast transformation for geochemical data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, (1): 19–25 (in Chinese with English abstract)]
- 纪宏金, 林瑞庆, 周永昶. 2001. 关于若干化探数据处理方法的讨论. *地质与勘探*, 37(4): 56–59 [Ji H J, Lin R Q, Zhou Y C. 2001. A discussion about some data processing methods in geochemical exploration. *Geology and Prospecting*, 37(4): 56–59 (in Chinese with English abstract)]
- 刘大文. 2004. 区域地球化学数据的归一化处理及应用. *物探与化探*, 28(3): 273–275, 279 [Liu D W. 2004. The normalization of regional geochemical data and its application. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 28(3): 273–275, 279 (in Chinese with English abstract with English abstract)]
- 刘强, 李伟, 王长琪. 2014. 黄土覆盖区地球化学数据采集及采样单元之间误差校正方法研究: 以内蒙古敖汉旗为例. *地质与资源*, 23(6): 587–592 [Liu Q, Li W, Wang C Q. 2014. Geochemical data collection and error correction for sampling in loess covered areas: A Case Study of Aohan County, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 23(6): 587–592 (in Chinese with English abstract)]
- Ouyang H G, Mao J W, Santosh M, Wu Y, Hou L, Wang X F. 2014. The Early Cretaceous Weilasituo Zn-Cu-Ag vein deposit in the southern Great Xing'an Range, Northeast China: Fluid inclusions, H, O, S, Pb isotope geochemistry and genetic implications. *Ore Geology Reviews*, 56: 503–515
- Ouyang H G, Mao J W, Zhou Z H, Su H M. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, north-eastern China. *Gondwana Research*, 27(3): 1153–1172
- Shaw D M, Bankier J D. 1954. Statistical methods applied to geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5(3): 111–123
- 时艳香, 纪宏金, 陆继龙. 2005. 地球化学数据的定和化及其在系统误差校正中的应用. *物探化探计算技术*, 27(1): 48–50 [Shi Y X, Ji H J, Lu J L. 2005. Addition of geochemical data and its application in systematic error correction. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(1): 48–50 (in Chinese with English abstract)]
- 宋承滨. 2022. 青海省都兰县五龙沟-开荒北地区地球化学数据的系统误差校正(硕士学位论文). 桂林: 桂林理工大学. [Song C B. 2022. Systematic error correction of geochemical data in Wulonggou-Kaihuang North area, Dulan county, Qinghai Province (Dissertation). Guilin University of Technology, Guilin (in Chinese with English abstract)]
- 王双, 张声桃, 魏俊浩, 胡月, 井国正, 李文君. 2023. 基于地球化学数据的多图幅台阶效应与试验校正的多种方法优选. *地质科技通报*, 42(3): 350–364 [Wang S, Zhang S T, Wei J H, Hu Y, Jing G Z, Li W J. 2023. Multiple-map step effect and optimization of various experimental correction methods based on geochemical data. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(3): 350–364 (in Chinese with English abstract)]
- 王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王玮, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征. *中国地质*, 43(5): 1469–1480 [Wang X Q, Zhou J, Xu S F, Chi Q H, Nie L S, Zhang B M, Yao W S, Wang W, Liu H L, Liu D S, Han Z X, Liu Q Q. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics. *Geology in China*, 43(5): 1469–1480 (in Chinese with English abstract)]
- 王学求. 2003. 矿产勘查地球化学: 过去的成就与未来的挑战. *地学前缘*, 10(1): 239–248 [Wang X Q. 2003. Exploration geochemistry: Past achievements and future challenges. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 239–248 (in Chinese with English abstract)]
- 王学求. 2013a. 勘查地球化学近十年进展. *矿物岩石地球化学通报*, 32(2): 190–197 [Wang X Q. 2013. A decade of exploration geochemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(2): 190–197 (in Chinese with English abstract)]
- 王学求. 2013b. 勘查地球化学80年来重大事件回顾. *中国地质*, 40(1): 322–330 [Wang X Q. 2013. Landmark events of exploration geochemistry in

- the past 80 years. *Geology in China*, 40(1): 322–330 (in Chinese with English abstract)]
- 王学求. 2025. “化学地球”大科学计划: 全球关键元素分布与循环. *地学前缘*, 32(1): 1–10 [Wang X Q. 2025. Big Science program on CHEMICAL EARTH: Global distribution and cycle of key elements. *Earth Science Frontiers*, 32(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)]
- Witte R S, Witte J S. 2009. *Statistics*. New York, USA: John Wiley & Sons
- 谢学锦, 刘大文, 向运川, 严光生. 2002. 地球化学块体: 概念和方法学的发展. *中国地质*, 29(3): 225–233 [Xie X J, Liu D W, Xiang Y C, Yan G S. 2002. Geochemical blocks-Development of concept and methodology. *Geology in China*, 29(3): 225–233 (in Chinese with English abstract)]
- 谢学锦, 任天祥, 奚小环, 张立生. 2009. 中国区域化探全国扫面计划卅年. *地球学报*, 30(6): 700–716 [Xie X J, Ren T X, Xi X H, Zhang L S. 2009. The implementation of the regional geochemistry-national reconnaissance program(RGNN) in China in the past thirty years. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 700–716 (in Chinese with English abstract)]
- 谢学锦. 2002. 勘查地球化学: 发展史·现状·展望. *地质与勘探*, 38(6): 1–9 [Xie X J. 2002. Exploration geochemistry: Retrospect and prospect. *Geology and Prospecting*, 38(6): 1–9 (in Chinese with English abstract)]
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 庞振山, 贾宏翔, 张志辉, 吴云峰, 李睿华. 2017. 大兴安岭南段内蒙古白音查干Sn多金属矿床石英斑岩的锆石U-Pb年龄、地球化学和Nd-Hf同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 33(10): 3183–3199 [Yao L, Lu Z C, Ye T Z, Pang Z S, Jia H X, Zhang Z H, Wu Y F, Li R H. 2017. Zircon U-Pb age, geochemical and Nd-Hf isotopic characteristics of quartz porphyry in the Baiyinchagan Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3183–3199 (in Chinese with English abstract)]
- 应祥熙. 2006. “标准正态转换法”用于化探数据特征的“反推”以及系统误差的调平. *地质与勘探*, 42(5): 84–89 [Ying X X. 2006. Using “conversion method of standard normal distribution” to “deduction” of geochemical prospecting data and revise of system error. *Geology and Prospecting*, 42(5): 84–89 (in Chinese with English abstract)]
- 赵玉岩, 李兵, 郝立波, 陆继龙, 赵禹, 孙立吉, 王晓丽. 2018. 化探背景异常划分的多背景变差衬度法. *物探化探计算技术*, 40(2): 235–240 [Zhao Y Y, Li B, Hao L B, Lu J L, Zhao Y, Sun L J, Wang X L. 2018. Method of contrast of variation coefficient for geochemical anomaly division on multi-background area. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(2): 235–240 (in Chinese with English abstract)]
- Zhou Z P, Thybo H, Tang C C, Artemieva I, Kusky T. 2022. Test of P-wave receiver functions for a seismic velocity and gravity model across the Baikal Rift Zone. *Geophysical Journal International*, 232(1): 176–189
- 朱华平, 张德全. 2003. 区域化探异常的地球化学勘查评价方法技术进展综述. *地质与勘探*, 39(3): 35–38 [Zhu H P, Zhang D Q. 2003. Research advances of geochemical survey methods and technologies of regional geochemical abnormalities. *Geology and Prospecting*, 39(3): 35–38 (in Chinese with English abstract)]
- Zuo R G, Wang J L. 2020. ArcFractal: An ArcGIS add-In for processing geoscience data using fractal/multifractal models. *Natural Resources Research*, 29(1): 3–12

(本文责任编辑: 李溪遥; 英文审校: 张兴春)