

文章编号: 1006-6616 (2017) 05-0695-12

西藏多龙矿集区水系沉积物地球化学 数据定量分析与解释

刘向冲^{1,2}, 王文磊^{1,2}, 裴英茹^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室, 北京 100081)

摘要: 位于西藏改则县的多龙矿集区是班公湖—怒江结合带最重要的斑岩型铜-金产地, 具有较大的找矿潜力。本文利用 MML-EM 算法 (Minimum Message Length-Expectation Maximization Algorithm) 和 ILR 变换 (Isometric Log-Ratio Transformation) 为基础的主成分分析定量研究多龙矿集区水系沉积物化探数据的统计分布规律。混合分布筛分结果表明, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Mn、Ag、Sn、W、Mo、As、Sb、Bi、Hg 和 Au 的元素含量都服从包含两个对数正态分布的混合分布。大部分元素的高均值子分布反映了该地区多期次岩浆或热液活动。通过作 ILR 变换 (Isometric Log-Ratio Transformation), 消除了多龙地区化探数据的闭合效应, 第一主成分的元素组合指示该地区的铜-金成矿潜力。多龙地区大部分铜-金矿床 (点) 和地表蚀变落在第一主成分得分较高的区域。根据第一主成分的得分, 本文圈定了若干个成矿潜力较大的靶区。

关键词: 多龙; 化探; 成分数据; 主成分分析; 混合分布

中图分类号: P632

文献标识码: A

0 引言

成分数据是一组部分占整体的比例数据, 这种数据只携带相对信息^[1]。作为成分数据分析领域的奠基人, Aitchison 于 20 世纪 80 年代首次提出对数比变换, 并将成分数据所在的空间称为单形 (simplex)^[2]。目前成分数据不再认为是具有定和的比值向量, 而扩展为比值向量的等价类。一个成分数据是一个代表任意元素组合的等价类, 其分量的和可以不是一个常数^[3]。单形与常见数据所在的实数欧几里德空间不同, 故以实数欧几里德空间为基础的多元统计方法不适用于成分数据^[4]。实现单形与实数欧几里德空间的变换成为成分数据分析的关键问题。2000 年以后, 成分数据分析方法取得两个重要进展。其中一个

Egozcue 团队在 2003 年提出等度量对数比变换^[5]。另一个重要进展是 Egozcue 团队在 2005 年提出 sequential binary partition 方法, 研究者利用该方法可构建有实际意义的对数比变换^[6]。经上述变换的成分数据可用于主成分分析、相关分析等多元统计分析^[7]。Pawlowsky-Glahn 团队的两本专著全面论述了成分数据统计分析理论与方法^[1,4]。国内学者在成分数据分析领域的研究成果较少且侧重于应用。周蒂在 1998 指出成分数据统计分析方法在地质领域所遇到的困难^[8]。孟宪伟等将成分数据的因子分析应用于地质样品的分类^[9]。杜德文等提出一种解决成分数据定和问题的方案^[10]。曾铃利用成分数据分析方法修正了斜长石—流体平衡湿度计^[11,12]。姜晓佳等利用基于对数比变换的主成分分析识别出组合地球化学异常^[13]。

位于西藏改则县的多龙矿集区是班公湖—怒

收稿日期: 2017-02-04

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20179142, DD20160026); 中国地质科学院基本科研业务费 (DZLXJK201603); 国家自然科学基金 (41602088, 41402295); 国家自然科学基金国家重点项目 (41430320); 国土资源部公益性行业科研专项 (201511017)

作者简介: 刘向冲 (1987-), 男, 助理研究员, 从事成矿动力学和数学地质等研究。E-mail: xliu@cags.ac.cn

通讯作者: 王文磊 (1983-), 男, 副研究员, 从事数学地质研究。E-mail: wenleiw@163.com

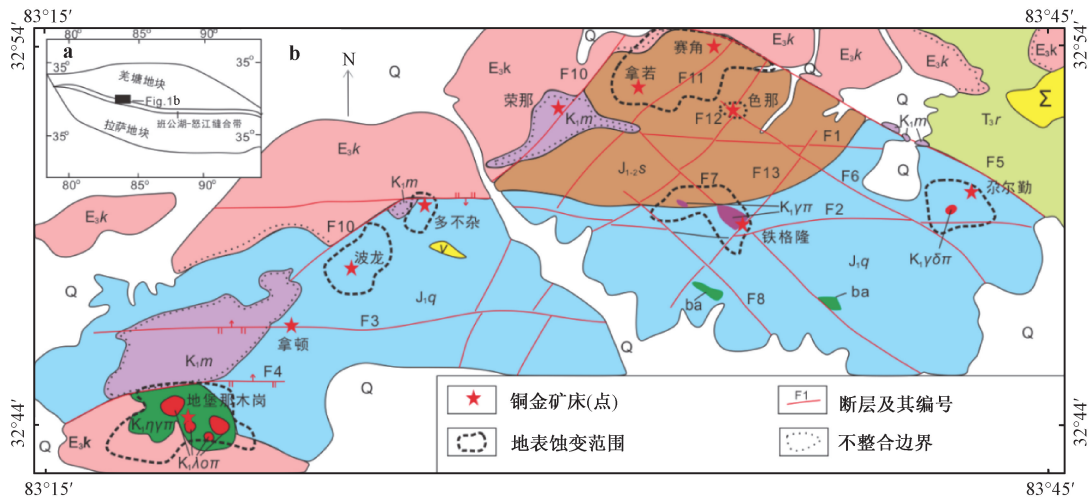
江成矿带最重要的找矿发现之一^[14]。化探数据在该地区的找矿勘探工作中发挥了重要作用^[15~19]，故化探数据的分析与解释直接影响找矿勘探工作的效果。化探元素数据是典型的成分数据^[20]，然而前人在分析多龙矿集区的化探数据时并未考虑成分数据的特殊性^[21~23]。笔者利用成分数据统计方法分析多龙矿集区水系沉积物化探数据，揭示这些数据隐藏的地质与地球化学信息，指导下一步的找矿勘探工作。

1 研究区与研究方法

西藏多龙矿集区位于西藏自治区改则县境内，地处班公湖—怒江缝合带北缘和南羌塘盆地（见图1）。该地区出露的地层有上三叠统日干配错组

(T_3r)、下侏罗统曲色组 (J_1q)、中—下侏罗统色哇组 ($J_{1-2}s$)、下白垩统美日切错组 (K_1m)、上渐新统康托组 (E_3k) 和第四系 (Q)。曲色组主要岩性为长石石英砂岩；色哇组为砂板岩；上三叠统日干配错组为灰岩，下白垩统美日切错组主要为安山岩，上渐新统康托组为砾砂岩。其中，下侏罗统曲色组和中—下侏罗统色哇组为矿集区内铜-金矿床（点）的含矿围岩^[17]。

区内断裂构造主要发育有三组，包括近东西向断裂构造、北东向断裂和北西向断裂。区内岩浆活动以喷发、喷溢及超浅成侵入为主，基性、中酸性、酸性岩浆岩均有出露。区内出露的中酸性侵入岩有二长花岗斑岩、花岗斑岩、花岗闪长斑等，它们的锆石 U-Pb 年龄在 116 ~ 128 Ma 范围^[24~30]；基性岩墙的 U-Pb 年龄为 126 ~ 127 Ma^[31]。



Q—第四系； E_3k —上渐新统康托组； K_1m —下白垩统美日切错组； $J_{1-2}s$ —中下侏罗统色哇组； J_1q —下侏罗统曲色组； T_3r —上三叠统日干配错组； $K_1\eta\pi$ —早白垩世二长花岗斑岩； $K_1\gamma\pi$ —早白垩世花岗斑岩； $K_1\lambda\pi$ —早白垩世石英斑岩； $K_1\gamma\delta\pi$ —早白垩世花岗闪长斑岩； v —辉长岩； ba —枕状玄武岩； Σ —蛇纹石化橄榄岩

图1 西藏多龙矿集区区域地质图（据文献[41]修改）

Fig. 1 Simplified geological map of Duolong mineral district, Tibet, China

近年来，地质工作者在该地区发现了多不杂、荣那（又称铁格隆南）、波龙等10个铜-金矿床（点）^[32~33]。其中，荣那为超大型斑岩—浅成低温热液型矿床^[33]，多不杂、波龙和拿若等为大型富金斑岩铜矿床^[21,25]。目前多龙矿集区探测的铜资源量已达到1600万吨，找矿潜力超2000万吨^[34]。已发现的铜-金矿床的成矿年龄约为118 ~ 121 Ma^[35~38]，矿石矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、方铅矿、闪锌矿等^[39~40]。

本文所用的多龙地区1:5万水系沉积物化探数

据来自3217件样品，野外采样密度平均为4个/ km^2 。样品测试工作由西南冶金地质测试中心完成。每个样品分析测量了Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Mn、Ag、Sn、W、Mo、As、Sb、Bi、Hg、Au 15个元素的含量。样品中Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Mn采用X射线荧光光谱法测定，Au含量采用泡沫吸附—硫脲解脱石墨炉原子吸收分光光度法测定，Ag和Sn的测定采用发射光谱法测定，样品中As、Sb、Bi、Hg的测定采用原子荧光光谱法测定，W和Mo的测定采用催化极谱法。15个元素报出率均

为100%。实验中,同时分析了国家一级标准物质,测试的准确度和精密度符合国家标准。

2 成分数据统计方法

成分数据是一种比值型无量纲数据,取值范围为 $[0, 1]$,与取值范围在负无穷和正无穷之间的统计数据不同^[4]。在地质领域,常见的成分数据有岩石的常量和微量元素含量等^[8]。成分数据统计分析的关键在于将成分数据变换到实数欧几里德空间不同^[4]。关于成分数据的处理与分析,目前学界已经提出三种变换:ALR变换(Additive Log-Ratio Transformation)、CLR变换(Centered Log-Ratio Transformation)和ILR变换(Isometric Log-Ratio Transformation)。三种变换的共同点在于变换形式都是变量的对数比值,因而统称为对数比变换。本质上来说,ALR变换和CLR变换不能消除成分数据的闭合效应,而ILR变换可以。原始成分数据经ALR变换和ILR变换之后,减少一个变量。CLR变换之后的数据与原始数的变量数相同^[4]。

2.1 ALR 变换

以一个岩石样品的地球化学数据 $x_1 = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}]'$ 为例, x_{j1} 代表岩石某元素的含量,ALR变换公式为^[42]:

$$a_{j1} = \log \frac{x_{j1}}{x_{m1}}, j = 1, \dots, m - 1$$

上述变换不一定以最后一个元素值 x_{m1} 为变换基础,实际上以任意一个元素为变换基础都是ALR变换;但使用不同的变换基础,后续的分析结果通常不是一样的。虽然ALR变换形式简单,但是变换后的变量 a_{j1} 常常缺乏明确的地质和地球化学意义。

2.2 CLR 变换

以 $x_1 = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}]'$ 为例,CLR变换公式为^[40]:

$$c_{j1} = \log \frac{x_{j1}}{g(x_1)}, j = 1, \dots, m$$

其中 $g(x_1)$ 是所有元素含量的几何平均数: $g(x_1) = \sqrt[m]{x_{11} \cdot x_{21} \cdot \dots \cdot x_{m1}}$ 。CLR变换是将成分数据作中心化变换,故变换后的数据 c_{j1} 还是表示对应的元素。然而,由于 $c_{11} + c_{21} + \dots + c_{m1} = 0$,CLR变换并未真正消除成分数据的闭合效应^[43]。

2.3 ILR 变换

以 $x_1 = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}]'$ 为例,ILR变换公式比较复杂^[5]:

$$s_{j1} = \sqrt{\frac{j}{j+1}} \log \frac{\sqrt[j]{x_{11}x_{21}\dots x_{j1}}}{x_{(j+1)1}}, j = 1, \dots, m - 1$$

ILR变换是在标准正交基向量下完成的,故欧几里德空间的统计方法也适用于变换后的成分数据。然而,与ALR变换类似,ILR变换后的变量 s_{j1} 缺乏明确的地球化学意义。Filzmoser^[44]利用CLR变换与ILR变换的转换矩阵(转换矩阵公式见文献[43]),将ILR变换后的主成分分析结果在CLR空间下表示出来,因而既克服了成分数据的闭合效应,又容易找到元素组合的地球化学意义。本文将采用Filzmoser提出的算法,对多龙地区水系沉积物化探数据作主成分分析,获取反映该地区地球化学的元素组合,以指导下一步的找矿勘探工作。

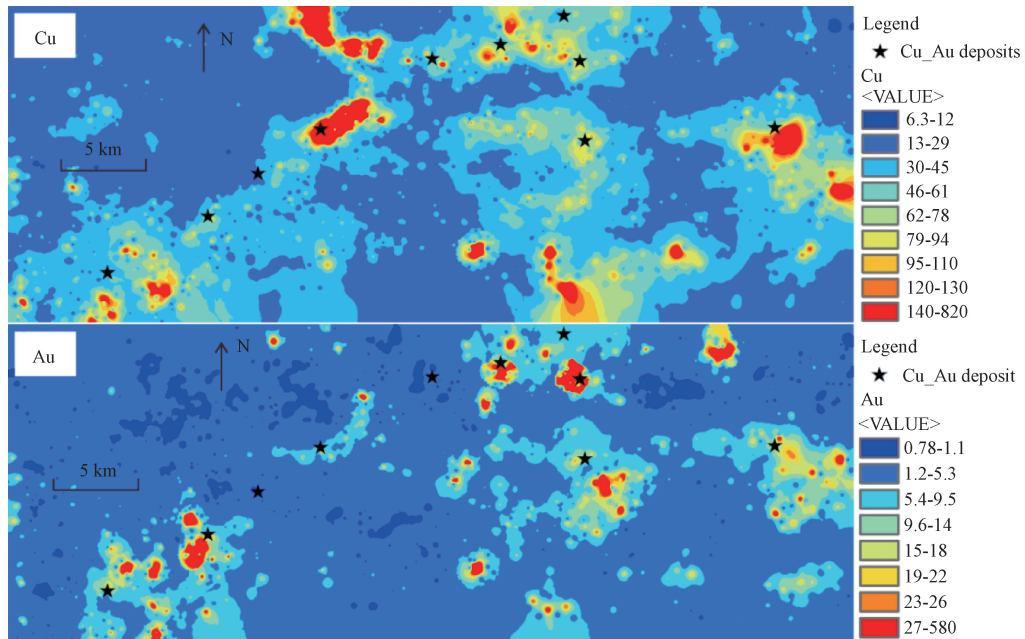
2.4 混合分布筛分方法

化探数据常因多个地质地球化学过程的影响而表现为混合分布,故混合分布的识别和筛分对于解释多个地质地球化学过程具有重要意义^[45]。刘向冲等利用MML等地质算法对江西大吉山钨矿化探数据进行混合分布筛分与解释,取得了较好的结果^[46]。MML算法是由Figueiredo和Jain基于最小信息长度准则(Minimum Message Length Criterion,简称MML)和期望最大化法(Expectation-Maximization Algorithm,简称EM)提出的^[47]。该算法在估计混合分布参数时比概率图法具有更高的精度,且有MATLAB程序包可实现该算法^[46]。本文将利用MML-EM算法分析与解释多龙矿集区水系沉积物化探数据,挖掘其中的地质与地球化学信息。

3 结果

图2显示了Cu和Au元素的空间模式。从图中可看出,只有一部分已发现的铜-金矿床(点)紧邻Cu和Au元素高值异常区域。Cr和Ni元素高值区域主要集中在多龙地区东北角(见图3)。

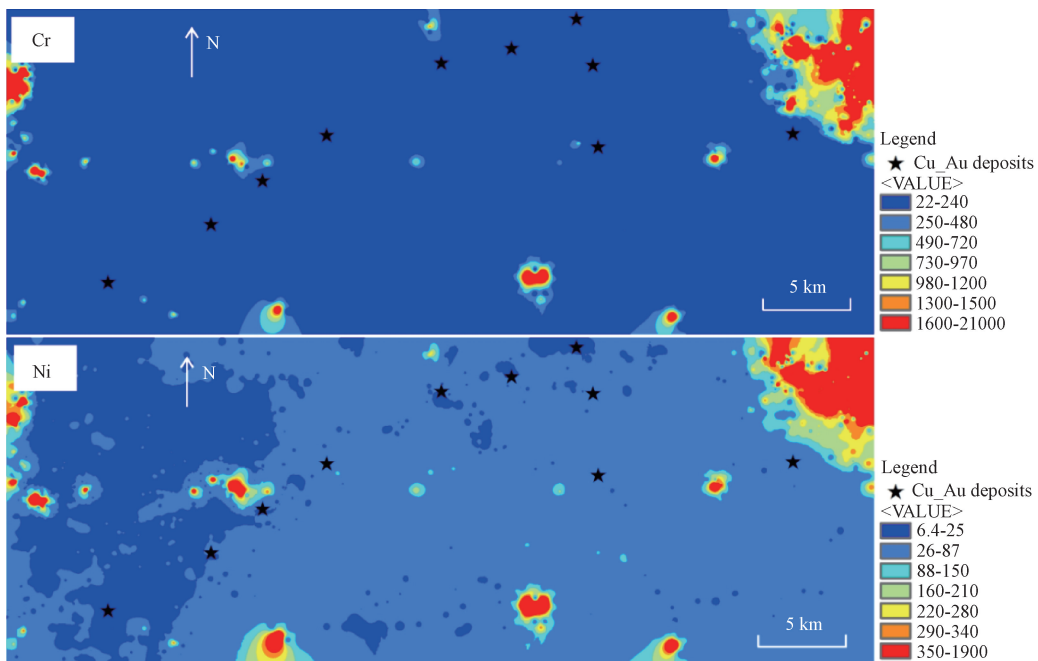
利用MML中多算法对这15个元素作统计分析。图4显示15个元素都包含两个对数正态分布,即服从双模式分布。对于元素Cu、Pb、Au、Zn、Sb、Bi、Hg、As、Ag、Mo、Mn、Cr和Ni,概率



两个元素含量的空间分布图是利用 ArcGIS 反距离加权方法差值得到的；图中黑色五角星为多龙地区已发现的铜-金矿床（点）

图 2 多龙地区水系沉积物 Cu 和 Au 元素含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the concentrations of Cu and Au in stream sediment in Duolong District



两个元素含量的空间分布图是利用 ArcGIS 反距离加权方法差值得到的；图中黑色五角星为多龙地区已发现的铜-金矿床（点）

图 3 多龙地区水系沉积物 Cr 和 Ni 元素含量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the concentrations of Cr and Ni in stream sediment in Duolong District

分布右侧较厚的尾部实际是双模式分布中均值较高的子分布（即 p_2 ）；对于元素 W 和 Sn，两个子分布的均值比较接近，叠加程度最大。Cr 和 Ni 元素的两个子分布概率密度函数叠加程度最小。

本文计算了原始化探数据经过对数变换后和 ILR 变换后的主成分分析结果。由于各元素含量值相差较大，计算主成分使用的是 15 个元素的相关系数矩阵。结果显示，经对数变换的 15 个元素

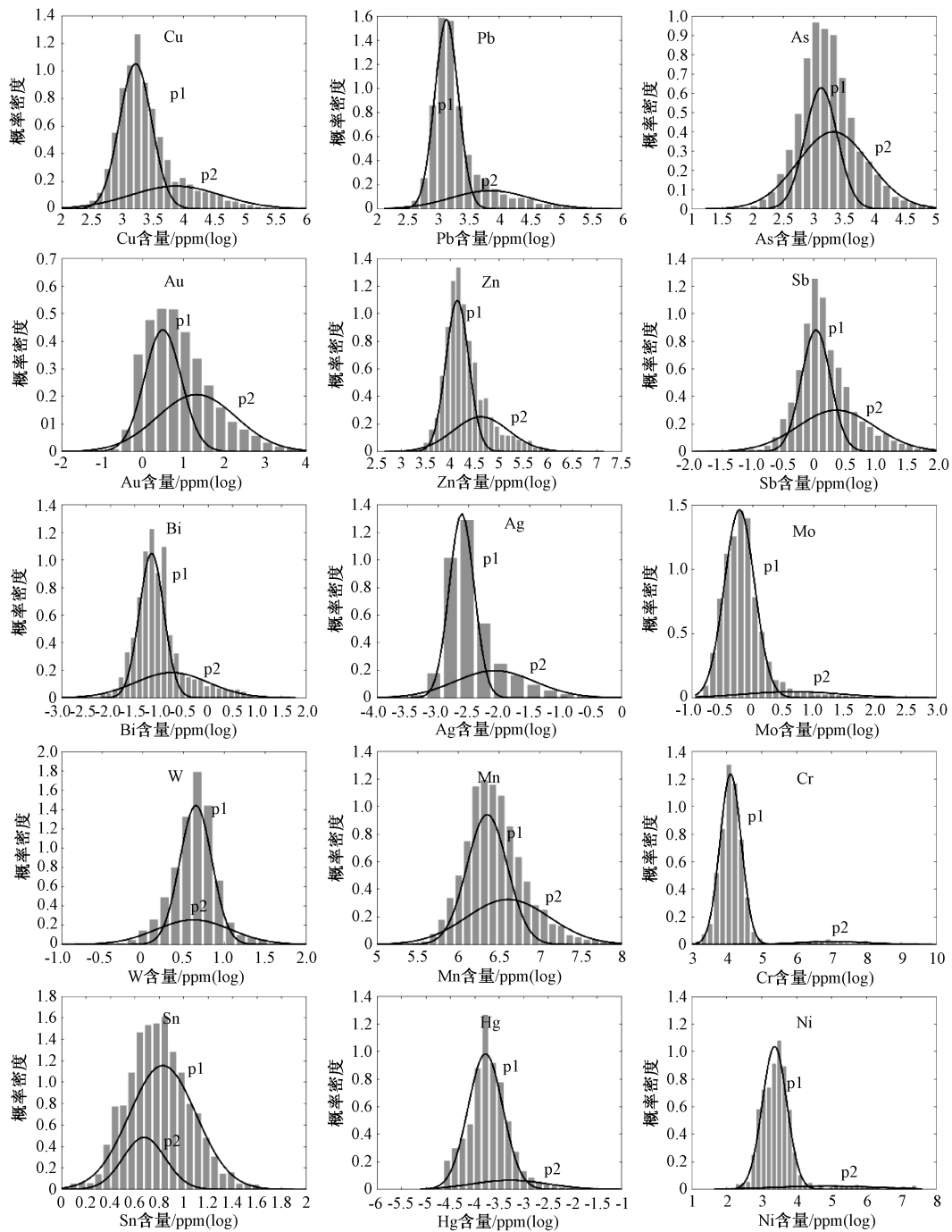


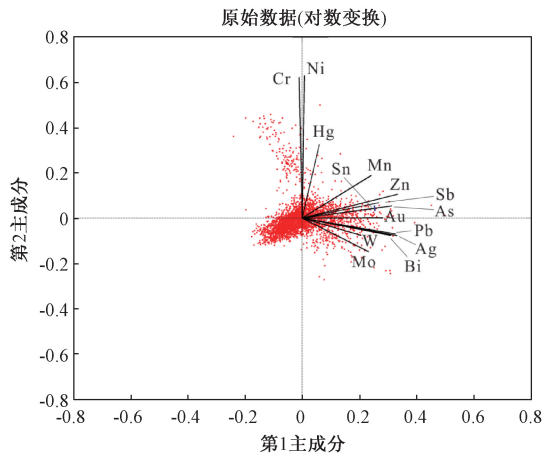
图4 多龙地区水系沉积物 15 个微量元素含量混合分布筛分结果

Fig. 4 Separation results of the mixed distribution of the 15 elements' concentration data in stream sediment in Duolong District

主要分布在主成分双标图的右半边 (见图 5)。除 Cr 外, 其余 14 个元素在第一主成分的载荷都是正数; Cr、Ni、Hg、Mn、Zn、Sb、Sn、As 和 Au 在第二主成分的载荷为正数, Mo、W、Bi、Cu、Ag 和 Pb 的载荷为负数。

根据 Filzmoser 提出的算法^[44], 本文对多龙地区化探数据作 ILR 变换, 计算其主成分并转换在

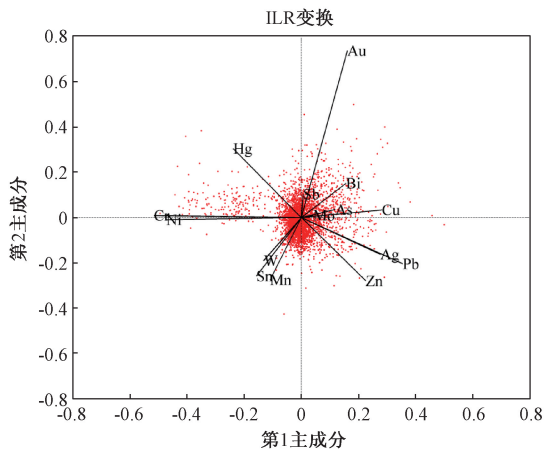
CLR 空间下显示其结果。经 ILR 变换的主成分双标图显示, 15 个元素较为均匀地分布在四个象限 (见图 6)。在第一主成分拥有正载荷的元素有 Pb、Cu、Ag、Zn、Au、Bi、As、Mo 和 Sb, Cr、Ni、Hg、Sn、W 和 Mn 拥有负载荷; 在第二主成分拥有正载荷的元素有 Au、Hg、Bi、Sb、As、Cu、Mo 和 Cr, 拥有负载荷的元素包含 Zn、Mn、Sn、Pb、



代表元素的线段由该元素在两个主成分的系数确定；红色圆点为对应主成分的得分；代表 Sn 和 As 元素的线段重合，图中截线的位置为 Sn 线段的终点

图5 多龙地区原始化探数据经对数变换后的主成分分析双标图

Fig. 5 Biplot of principle component analysis of the logarithm-transformed geochemical data in Duolong District



图中红色圆点为第一和第二主成分的得分

图6 多龙地区化探数据经 ILR 变换后主成分分析在 CLR 空间的双标图

Fig. 6 Biplot of principle component analysis of the ILR-transformed geochemical data in Duolong District

W、Ag 和 Ni。

4 讨论

蛇纹石化橄榄岩出露的位置与 Cr 和 Ni 的高值区域对应（见图 1、图 3）。由于基性岩和超基性岩的 Cr 和 Ni 含量通常较高^[48]，笔者认为多龙地

区 Cr 和 Ni 元素高值异常反映了该地区基性岩和超基性岩的影响，零星分布的 Cr 和 Ni 元素较小的高值区域可能与尚未揭露的基性岩或超基性岩（脉）有关。Cr 和 Ni 元素含量服从两个对数正态分布组成的混合分布，两个子分布的均值相差较大。考虑到该地区出露的基性岩和超基性岩形成时代早于中酸性岩体的形成时代和 Cu-Au 成矿年龄^[49]，笔者认为 Cr 和 Ni 元素其高均值的子分布反映了基性岩和超基性岩的影响，与 Cu-Au 成矿没有直接关系，而它们的低均值子分布代表了背景地球化学过程。

多龙地区已发现的铜-金矿床（点）主要富集 Cu、Au、Mo 等亲硫元素，故 Cu、Pb、As、Au、Zn、Sb、Bi、Ag、Hg 和 Mo 等元素的高值异常可能与该地区多期次斑岩体侵入和相关的岩浆热液活动有关。Cu、Pb、As、Au、Zn、Sb、Bi、Ag、Hg 和 Mo 等元素的高均值子分布可能反映了多期次中酸性岩浆活动的影响，它们的低均值子分布可能反映了背景地球化学过程。虽然 W 和 Sn 元素含量也服从双模式分布，但两个子分布的均值非常接近。这可能是由于该地区的多期次岩浆活动对 W 和 Sn 元素的影响较小。

化探元素数据是典型的成分数据。对比图 5 和图 6 不难发现，对原始化探数据直接作主成分分析有两个重要缺陷。其一，由于成分数据存在闭合效应，原始化探数据的第一主成分的载荷几乎都为正数^[48]，且这一现象普遍存在^[51-56]。其二，从地球化学的角度，承载最大信息量的第一主成分通常是难以解释的。通过对多龙地区 15 个元素的空间分布和统计分布规律可知，这 15 个元素指示了不同的地质地球化学过程；然而，原始数据第一主成分所代表的元素组合却包含其中 14 个元素。

经过 ILR 变换得到的第一主成分有较为明确的地球化学意义。在第一主成分拥有正载荷的元素（Pb、Cu、Ag、Bi、As 等）属于亲硫元素^[57]，且与多龙地区已发现的铜-金矿床（点）有密切联系。故这些元素的含量越高意味着铜-金成矿潜力的越大。在第一主成分拥有负载荷的 Cr 和 Ni 元素分别属于亲石元素和亲铁元素^[57]，与早于斑岩的基性岩和超基性岩侵入活动有关；W 和 Sn 元素分别属于亲石元素和亲硫元素^[57]，它们的富集成矿通常与 S 型花岗岩有关，而多龙地区发育的为 I 型花岗岩^[58]。由此可见，第一主成分的元素组合可

指示多龙地区的铜-金成矿潜力, 其得分可用于圈定铜-金成矿预测靶区。

图 7 对比了对数变换后和 ILR 变换后的第一主成分得分。为了方便对比, 第一主成分的得分均作了标准化处理。该图叠加了多龙地区已发现的铜-金矿床 (点) 和地表蚀变。两个得分图的最大区别是 ILR 变换后的第一主成分在东北角得分较低, 且低值范围较大; 其次, ILR 变换后的第一主成分在西南角 (地堡那木岗附近) 有较大范围的

高分, 在尕尔勤附近的高得分范围较小。由表 1 可知, ILR 变换后的第一主成分载荷 ≥ 0.28 的元素有 Cu、Pb、Zn 和 Ag, 而对数变换后的第一主成分的载荷 ≥ 0.28 的元素有 Cu、Pb、Zn、Ag、As、Bi 和 Au。两种变换的高载荷元素相似, 这是造成两个得分图高值区域相似的主要原因。Cr 和 Ni 元素在 ILR 变换后的第一主成分有绝对值较大的负载荷, 这使得基性岩和超基性岩出露的区域得分很低。

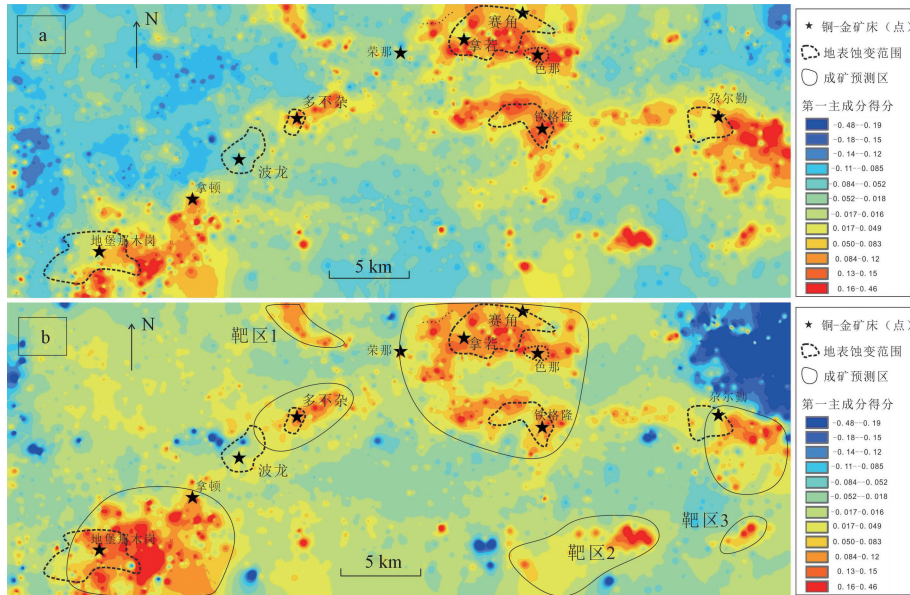


图 7 多龙地区化探数据对数变换后 (a) 和经 ILR 变换后 (b) 的第一主成分得分图 (地表蚀变范围据 [41] 修改)

Fig. 7 Score maps of the first component in the logarithm-transformed (A) and ILR-based (B) principle component analysis in Duolong District

表 1 经对数变换和 ILR 变换的第一主成分载荷

Table 1 Loadings of the first component of the logarithm-transformed and ILR-based principle component analysis

元素	对数变换后的第一主成分	ILR 变换后的第一主成分
Cu	0.31	0.28
Pb	0.33	0.36
Zn	0.33	0.23
Cr	-0.01	-0.52
Ni	0.01	-0.47
Mn	0.24	-0.11
Ag	0.33	0.28
Sn	0.26	-0.16
W	0.21	-0.13
Mo	0.23	0.04
As	0.31	0.12
Sb	0.27	0.01
Bi	0.31	0.16
Hg	0.06	-0.24
Au	0.28	0.16

多龙地区大部分铜-金矿床 (点) 和地表蚀变落在 ILR 变换后的第一主成分得分较高的区域, 且这些区域面积较大。这说明第一主成分的得分有一定的预测能力。笔者根据第一主成分的得分圈定了 3 个预测靶区。靶区 1 的高得分与该位置的 Cu 异常有关; 根据野外验证得知, 此处的 Cu 异常与荣那斑岩—浅成低温热液型矿床有关。靶区 2 是 3 个预测靶区中面积最大的。前人近期在靶区 2 发现出露面积较小的闪长岩^[31]。Wang 利用多重分形模型预测靶区 2 有较大的成矿潜力^[15]。鉴于斑岩型铜矿床与中酸性岩体的密切关系, 笔者认为靶区 2 的成矿潜力最高, 建议优先安排进一步工作查证。靶区 3 的面积相对较小, 它的查证优先级别低于靶区 2。另外, 多龙地区西南角高分区域面积最大。目前在此区域只发现了地堡那木岗和拿顿

两个矿床(点), 仍需进一步查找异常的来源。

5 结论

本文利用 ILR 成分数据变换和 MML-EM 算法定量分析多龙矿集区水系沉积物化探数据的统计分布规律, 并对化探数据作出如下解释。

(1) 15 个化探元素含量都服从包含两个对数正态分布的混合分布。Cr 和 Ni 元素高均值的子分布反映了该地区基性岩和超基性岩侵入活动的影响; Cu、Pb、As、Au、Zn、Sb、Bi、Ag、Hg 和 Mo 等元素的高均值子分布可能反映了多期中酸性岩浆活动的影响; W 和 Sn 元素的两个子分布的均值非常接近, 可能是因为该地区的多期次岩浆活动对 W 和 Sn 元素的影响较小。

(2) 直接对原始化探数据作主成分分析不能消除成分数据的闭合效应, 也难以得到有明确地球化学意义的元素组合。ILR 变换为基础的主成分分析可识别出反映该地区不同地球化学过程的元素组合。第一主成分的元素组合可指示多龙地区的铜-金成矿潜力。多龙地区大部分铜-金矿床(点)和地表蚀变落在第一主成分得分较高的区域。根据第一主成分的得分, 本文圈定了若干个成矿潜力较大的靶区。

参考文献/References

- [1] Pawlowsky-Glahn V, Buccianti A. Compositional data analysis: theory and applications [M]. London: John Wiley & Sons, 2011, 378.
- [2] Aitchison J. The statistical analysis of compositional data [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1982, 44 (2): 139 ~ 177.
- [3] Pawlowsky-Glahn V, Egozcue J J. Spatial analysis of compositional data: a historical review [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016, 164: 28 ~ 32.
- [4] Pawlowsky-Glahn V, Egozcue, J J, Tolosana-Delgado R. Modeling and analysis of compositional data [M]. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2015, 272.
- [5] Egozcue J J, Pawlowsky-Glahn V, Mateu-Figueras G, et al. Isometric logratio transformations for compositional data analysis [J]. Mathematical Geology, 2003, 35 (3): 279 ~ 300.
- [6] Egozcue J J, Pawlowsky-Glahn V. Groups of parts and their balances in compositional data analysis [J]. Mathematical Geology, 2005, 37 (7): 795 ~ 828.
- [7] Filzmoser P, Hron K. Correlation analysis for compositional data [J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41 (8): 905 ~ 919.
- [8] 周蒂. 地质成分数据统计分析——困难和探索 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23 (2): 147 ~ 152.
ZHOU Di. Geological compositional data analysis: difficulties and solutions [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23 (2): 147 ~ 152. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙. 成分数据的因子分析及其在地质样品分类中的应用 [J]. 长春科技大学学报, 2000, 30 (4): 367 ~ 370.
MENG Xianwei, DU Dewen, WU Jinlong. Factor analysis for compositional data and its application to the classification of geological samples [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30 (4): 367 ~ 370. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杜德文, 袁业立, 孟宪伟. 成分数据统计分析的定和问题解决方案 [J]. 地质论评, 2002, 46 (S): 364 ~ 366.
DU Dewen, YUAN Yeli, MENG Xianwei. Solutions of composition translation in composition data analysis [J]. Geological Review, 2002, 46 (S): 364 ~ 366. (in Chinese with English abstract)
- [11] 曾铃. 基于成分数据分析和二次混合模型的斜长石—流体温度计/湿度计 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014, 123.
ZENG Ling. Plagioclase-liquid thermometer/hygrometer based on compositional data analysis & quadratic mixture model [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014, 123. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zeng L, Cheng L L, Cheng Q M, et al. A refinement of Lange's plagioclase-liquid hygrometer/thermometer based on quadratic log-contrast models for experiments with mixtures [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 141: 89 ~ 99.
- [13] 姜晓佳, 陈鑫, 郑有业, 等. 拉脊山东段地区 Au、Cu 地球化学组合异常识别与提取 [J]. 物探与化探, 2017, 41 (3): 459 ~ 467.
JIANG Xiaojia, CHEN Xin, ZHENG Youye, et al. The recognition and extraction of Au, Cu geochemical composite anomalies: A case study of the east of Laji Mountains [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41 (3): 459 ~ 467. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 等. 西藏班公湖—怒江成矿带研究进展及一些新认识 [J]. 地球科学进展, 2014, 29 (7): 795 ~ 809.
SONG Yang, TANG Juxing, QU Xiaoming, et al. Progress in the study of mineralization in the Bangongco-Nujiang metallogenic belt and some new recognition [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29 (7): 795 ~ 809. (in Chinese with English abstract)
- [15] Wang W L, Cheng Q M, Tang J X, et al. Fractal/multifractal analysis in support of mineral exploration in the Duolong mineral district, Tibet, China [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2017, 17 (3): 261 ~ 276.
- [16] 江少卿, 孙兴国, 杨铁铮, 等. 藏北多龙斑岩铜金矿集区综

- 合信息找矿模型研究 [J]. 中国地质, 2014, 41 (2): 497 ~ 509.
- JIANG Shaoqing, SUN Xingguo, YANG Tiezheng, et al. Integrated anomaly model and metallogenic prediction of the Duolong porphyry copper-gold ore concentration area in northern Tibet [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (2): 497 ~ 509. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 等. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型 [J]. *地质与勘探*, 2012, 48 (2): 274 ~ 287.
- LI Yunbin, DUO Ji, ZHONG Wanting, et al. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize Country, Northern Tibet [J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48 (2): 274 ~ 287. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨少平, 刘华忠, 刘应汉, 等. 西藏多不杂地区区域化探扫描面点测量及其外围找矿前景地球化学预测 [J]. *物探与化探*, 2017, 41 (2): 203 ~ 209.
- YANG Shaoping, LIU Huazhong, LIU Yinghan, et al. Regional geochemical survey and prospecting prognosis of the Duobuza region and its peripheral areas in Tibet [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41 (2): 203 ~ 209. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张志, 唐菊兴, 杨毅, 等. 西藏尔穷铜金矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型 [J]. *地球学报*, 2012, 33 (4): 663 ~ 672.
- ZHANG Zhi, TANG Juxing, YANG Yi, et al. Element spatial distribution of the Gaerqiong copper-gold deposit in Tibet and its geochemical exploration model [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33 (4): 663 ~ 672. (in Chinese with English abstract)
- [20] Buccianti A, Grunsky E. Compositional data analysis in geochemistry: are we sure to see what really occurs during natural processes? [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 141: 1 ~ 5.
- [21] 方向, 唐菊兴, 李彦波, 等. 西藏多龙矿集区拿若铜 (金) 矿床成矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型 [J]. *中国地质*, 2014, 41 (3): 936 ~ 950.
- FANG Xiang, TANG Juxing, LI Yanbo, et al. Metallogenic element spatial distribution of the Naruo copper (gold) deposit in the Duolong ore concentration area of Tibet and its geochemical exploration model [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (3): 936 ~ 950. (in Chinese with English abstract)
- [22] 苏和, 张善明, 柳长峰, 等. 半荒漠戈壁地区土壤地球化学找矿研究——以阿拉善右旗塔布格地区为例 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23 (3): 487 ~ 497.
- Su He, Zhang Shanming, Liu Changfeng, et al. A study on ore prospecting with pedogeochemistry in semi-desert and gobi area—taking Tabuge area in alixa right banner of inner Mongolia as a case [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017 23 (3): 487 ~ 497. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴俊, 卜建军, 谢国刚, 等. 区域化探数据在华南强烈风化区地质填图中的应用 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (4): 955 ~ 966.
- Wu Jun, Bu Jianjun, Xie Guogang, et al. Application of regional geochemical data in geological mapping in strongly weathered area in southern China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (4): 955 ~ 966. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈华安, 祝向平, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义 [J]. *地质学报*, 2013, 87 (10): 1593 ~ 1611.
- CHEN Hua'an, ZHU Xiangping, MA Dongfang, et al. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet and its mineralizing significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87 (10): 1593 ~ 1611. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁师, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 西藏拿若斑岩型铜 (金) 矿含矿岩体年代学、地球化学及地质意义 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2017, 42 (1): 1 ~ 23.
- DING Shuai, TANG Juxing, ZHENG Wenbao, et al. Geochronology and geochemistry of Naruo porphyry Cu (Au) deposit in Duolong ore-concentrated area, Tibet, and their geological significance [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2017, 42 (1): 1 ~ 23. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (3): 531 ~ 543.
- LI Jinxiang, LI Guangming, QIN Kezhang et al. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (3): 531 ~ 543. (in Chinese with English abstract)
- [27] Li J X, Qin K Z, Li, G M, et al. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41 (6): 525 ~ 536.
- [28] Li J X, Qin K Z, Li, G M, et al. Petrogenesis of ore-bearing porphyries from the Duolong porphyry Cu-Au deposit, central Tibet: evidence from U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotope characteristics [J]. *Lithos*, 2013, 160 ~ 161: 216 ~ 227.
- [29] 李兴奎, 李才, 孙振明, 等. 西藏赛角铜金矿闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征及成矿意义 [J]. *地质通报*, 2015, 34 (5): 908 ~ 918.
- LI Xingkui, LI Cai, SUN Zhenming, et al. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope, and whole-rock geochemistry of diorite in the Saijiao Cu-Au deposit, Tibet, and its ore-forming significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (5): 908 ~ 918. (in Chinese with English abstract)
- [30] 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义 [J]. *地质学报*, 2015, 89 (3): 534 ~ 548.

- ZHU Xiangping, CHEN Hua'an, LIU Hongfei, et al. Zircon U-Pb ages, geochemistry of the porphyries from the Duobuza porphyry Cu-Au deposit, Tibet and their metallogenic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89 (3): 534 ~ 548. (in Chinese with English abstract)
- [31] Xu W, Li C, Wang M, et al. Subduction of a spreading ridge within the Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean: Evidence from early cretaceous mafic dykes in the Duolong porphyry Cu-Au deposit, western Tibet [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 128 ~ 141.
- [32] 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体证据 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (5): 935 ~ 952.
- LI Guangming, LI Jinxiang, QIN Kezhang, et al. High temperature, salinity and strong oxidation ore-forming fluid at Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in the Bangonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from fluid inclusions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (5): 935 ~ 952. (in Chinese with English abstract)
- [33] 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 等. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜 (金银) 矿床 [J]. *地球学报*, 2014, 35 (1): 6 ~ 10.
- TANG Juxing, SUN Xingguo, DING Shuai, et al. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, 35 (1): 6 ~ 10. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李富, 王永华, 焦彦杰, 等. 多龙矿集区物探异常特征及找矿方向 [J]. *地球物理学进展*, 2016, 31 (1): 217 ~ 224.
- LI Fu, WANG Yonghua, JIAO Yanjie, et al. Geophysical anomaly characteristics and prospecting direction of Duolong mining area [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31 (1): 217 ~ 224. (in Chinese with English abstract)
- [35] 余宏全, 李进文, 马东方, 等. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义 [J]. *矿床地质*, 2009, 28 (6): 737 ~ 746.
- SHE Hongquan, LI Jinwen, MA Dongfang, et al. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28 (6): 737 ~ 746. (in Chinese with English abstract)
- [36] 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (7): 2159 ~ 2164.
- ZHU Xiangping, CHEN Hua'an, MA Dongfang, et al. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (7): 2159 ~ 2164. (in Chinese with English abstract)
- [37] 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 西藏多不杂斑岩铜金矿床长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义 [J]. *现代地质*, 2012, 26 (4): 656 ~ 662.
- ZHU Xiangping, CHEN Hua'an, MA Dongfang, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating for K-feldspar from Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance [J]. *Geoscience*, 2012, 26 (4): 656 ~ 662. (in Chinese with English abstract)
- [38] 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床长石和绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2013, 32 (5): 954 ~ 962.
- ZHU Xiangping, CHEN Hua'an, MA Dongfang, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating of hydrothermal K-feldspar and hydrothermal sericite from Bolong porphyry Cu-Au deposit in Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32 (5): 954 ~ 962. (in Chinese with English abstract)
- [39] 杨毅, 张志, 唐菊兴, 等. 西藏多龙矿集区波龙斑岩铜矿床蚀变与脉体系统 [J]. *中国地质*, 2015, 42 (3): 759 ~ 776.
- YANG Yi, ZHANG Zhi, TANG Juxing, et al. Mineralization, alteration and vein systems of the Bolong porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, Tibet [J]. *Geology in China*, 2015, 42 (3): 759 ~ 776. (in Chinese with English abstract)
- [40] 张志, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏多不杂富金斑岩铜矿床蚀变与脉体系统 [J]. *矿床地质*, 2014, 33 (6): 1268 ~ 1286.
- ZHANG Zhi, CHEN Yuchuan, TANG Juxing, et al. Alteration and vein systems of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33 (6): 1268 ~ 1286. (in Chinese with English abstract)
- [41] 杨超, 唐菊兴, 王艺云, 等. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究 [J]. *矿床地质*, 2014, 33 (6): 1287 ~ 1305.
- YANG Chao, TANG Juxing, WANG Yiyun, et al. Fluid and geological characteristics researches of southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33 (6): 1287 ~ 1305. (in Chinese with English abstract)
- [42] Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data* [M]. London: Chapman and Hall, 1986, 416.
- [43] Wang W L, Zhao J, Cheng Q M. Mapping of Fe mineralization-associated geochemical signatures using logratio transformed stream sediment geochemical data in eastern Tianshan, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 141: 6 ~ 14.
- [44] Filzmoser P, Hron K, Reimann C. Principal component analysis for compositional data with outliers [J]. *Environmetrics*, 2009, 20 (6): 621 ~ 632.
- [45] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. *矿床统计预测* [M]. 北京: 地质出版社, 1994, 314.
- ZHAO Pengda, HU Wangliang, LI Zijin. *Statistical prediction of mineral deposits* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994, 314. (in Chinese)
- [46] 刘向冲, 侯翠霞, 申维, 等. MML-EM 方法及其在化探数据混合分布中的应用 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2011, 36 (2): 355 ~ 359.

- LIU Xiangchong, HOU Cuixia, SHEN Wei, et al. MML-EM algorithm and its application on mixed distributions of geochemical data [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36 (2): 355 ~ 359. (in Chinese with English abstract)
- [47] Figueiredo M A T, Jain A K. Unsupervised learning of finite mixture models [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24 (3): 381 ~ 396.
- [48] Oze C, Fendorf S, Bird D K, et al. Chromium geochemistry of serpentine soils [J]. *International Geology Review*, 2004, 46 (2): 97 ~ 126.
- [49] 许伟, 胡培远, 王明, 等. 西藏改则县多龙矿集区发现岩墙岭蛇绿岩残片 [J]. *地质通报*, 2016, 35 (5): 642 ~ 647.
- XU Wei, HU Peiyuan, WANG Ming, et al. Yanqiang Ling ophiolitic remnants has been discovered in Duolong ore concentration area, Gêrzê County, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35 (5): 642 ~ 647. (in Chinese with English abstract)
- [50] Filzmoser P, Hron K, Reimann C. The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408 (19): 4230 ~ 4238.
- [51] 林鑫, 周军, 张兵. 基于主成分分析的化探异常圈定新方法——以新疆西准噶尔地区 1:50000 岩屑数据为例 [J]. *地质找矿论丛*, 2012, 27 (4): 516 ~ 521.
- LIN Xin, ZHOU Jun, ZHANG Bing. A new principal component analysis-based method for lineation of geochemical anomalies: a case study of detritus data (1/50000) of western Junggar, Xinjiang [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2012, 27 (4): 516 ~ 521. (in Chinese with English abstract)
- [52] 杨自安, 徐国端, 邹林, 等. 化探与遥感信息在青海两兰地区找矿预测中的应用 [J]. *地质与勘探*, 2003, 39 (6): 42 ~ 45.
- YANG Zi'an, XU Guorui, ZOU Lin, et al. The application of geochemical exploration and remote sensing information to ore-prospecting prognosis in the Dulan-Wulan area, Qinghai province [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39 (6): 42 ~ 45. (in Chinese with English abstract)
- [53] 蒋立军, 邢立新, 梁一鸿, 等. 融合化探信息的遥感异常提取 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2011, 41 (3): 932 ~ 936.
- JIANG Lijun, XING Lixin, LIANG Yihong, et al. Anomalies information extraction from geochemical data and remote sensing fusion [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41 (3): 932 ~ 936. (in Chinese with English abstract)
- [54] 曾敏, 彭红霞, 刘凤梅. 地球化学元素分布特征分析在找矿中的应用——以江西省遂川县金坑金矿为例 [J]. *有色金属*, 2011, 63 (2): 225 ~ 229.
- ZENG Min, PENG Hongxia, LIU Fengmei. Application of geochemical elements distribution characteristics in prospecting—a case for Jinkeng gold mine in Suichuan, Jiangxi [J]. *Nonferrous Metals*, 2011, 63 (2): 225 ~ 229. (in Chinese with English abstract)
- [55] 郭娜, 郭科, 胡敬仁, 等. 多元信息分析技术在西藏林周地区找矿中的应用 [J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2011, 38 (4): 463 ~ 470.
- GUO Na, GUO Ke, HU Jingren, et al. Technology of multielement information analysis used for seeking ore deposits in Linzhou area of Tibet, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38 (4): 463 ~ 470. (in Chinese with English abstract)
- [56] 肖凡, 陈建国, 侯卫生, 等. 钦-杭结合带南段庞西垌地区 Ag-Au 致矿地球化学异常信息识别与提取 [J]. *岩石学报*, 2017, 33 (3): 779 ~ 790.
- XIAO Fan, CHEN Jianguo, HOU Weisheng, et al. Identification and extraction of Ag-Au mineralization associated geochemical anomaly in Pangxitong district, southern part of the Qinzhou-Hangzhou Metallogenic Belt, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (3): 779 ~ 790. (in Chinese with English abstract)
- [57] White W M. *Geochemistry* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2013, 261.
- [58] 韦少港, 宋扬, 唐菊兴, 等. 西藏色那铜 (金) 矿床石英闪长玢岩年代学、地球化学与岩石成因 [J]. *中国地质*, 2016, 43 (6): 1894 ~ 1912.
- WEI Shaogang, SONG Yang, TANG Juxing, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of quartz diorite porphyrite from the Sena copper (gold) deposit, Tibet [J]. *Geology in China*, 2016, 43 (6): 1894 ~ 1912. (in Chinese with English abstract)

QUANTITATIVE ANALYSIS AND INTERPRETATION OF THE GEOCHEMICAL DATA OF THE STREAM SEDIMENT IN DUOLONG MINERAL DISTRICT, TIBET, CHINA

LIU Xiangchong^{1,2}, WANG Wenlei^{1,2}, PEI Yingru^{1,2}

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *The Laboratory of Dynamic Digenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China*)

Abstract: Geochemical data are typical compositional data and their closure effect exists in the rock major elements as well as in all trace elements and their arbitrary subsets. However, the closure effect is often ignored in many cases. Ten porphyry and epithermal Cu-Au deposits were recently found in Duolong mineral district, northwest Tibet, China. There are still great prospecting potential of copper resources in Duolong. The geochemical data of the stream sediment in Duolong were analyzed using Minimum Message Length-Expectation Maximization Algorithm (MML-EM) and Isometric Logratio Transformation (ILR) based on principal component analysis. It is found that all the fifteen elements data contain two log-normal populations. The high-average population of most elements reflects the multiple magmatic activities or hydrothermal processes in Duolong. The closure effect was overcome after ILR transformation and the element associations in the first principal component were interpreted to be indicators for the Cu-Au mineralization potential in Duolong. The areas with high scores of the first component are consistent with most of the found Cu-Au deposits and the alteration zones exposed at surface. Four zones with high scores are suggested for further investigation on their mineral potential.

Key words: Duolong; geochemical prospecting; compositional data; principal component analysis; mixed distribution