2023年4月 矿 床 地 质 第42卷 第2期
April, 2023 MINERAL DEPOSITS 42 (2): 287~309

文章编号: 0258-7106 (2023) 02-0287-23 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2023. 02. 004

西藏多龙尕尔勤
——一个遭受过剥蚀的浅成低温热液金矿床*

孙 豪[1],宋 扬[1**],李发桥[2],李子琛[2],王 旭[2],李 阳[1],郑 明[1],方 颖[2]
(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037; 2 中国地质大学(北京),地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要 西藏具有形成巨型斑岩铜成矿系统的地质背景。浅成低温热液型金矿常发育于斑岩铜成矿系统上部,极具经济价值,但由于形成深度较浅,易于剥蚀,目前西藏地区尚未发现独立的浅成低温热液型金矿床。多龙超大型铜金矿集区位于西藏班公湖-怒江成矿带西段,产出有大型-超大型斑岩-浅成低温热液型铜金矿床,而是否存在独立的浅成低温热液型金矿,既是重大科学问题,也是勘查的重点方向。文章运用超景深高分辨数码显微镜、扫描电镜及电子探针等手段,系统研究了多龙矿集区尕尔勤矿区内的残坡积物和外围水系沉积物中746颗砂金的大小、形貌、核部元素及不透明矿物包体特征,发现尕尔勤矿区内广泛分布的砂金不是表生环境下生物化学或化学成因金,而是尕尔勤产出的金矿(化)体剥蚀的产物。砂金普遍含有较高的 w(Bi)、极低的 w(Cu),部分含有高的 w(Hg)、w(Te);砂金 w(Ag)变化较大(0.05%~40.21%);金成色变化范围较大(588~999);砂金富含 Bi-Pb-Te-S 系列矿物包体等,显示尕尔勤矿区可能存在一个遭受过剥蚀的浅成低温热液金矿床。

关键词 地球化学;砂金;金矿;浅成低温热液;多龙;西藏
中图分类号:P618.51 **文献标志码**:A

Gaerqin deposit in Duolong ore district, Tibet: An epithermal gold deposit that suffered from erosion

SUN Hao[1], SONG Yang[1], LI FaQiao[2], LI ZiChen[2], WANG Xu[2], LI Yang[1], ZHENG Ming[1] and FANG Ying[2]
(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract

Tibet has a favorable geological background for forming giant porphyry copper systems. However, compared with porphyry Cu (Au-Mo) deposits, independent epithermal gold deposits with significant economic value developed in the upper part of the porphyry copper system have not been discovered so far in this region, mainly due to the shallower depth to be more susceptible to erosion. The Duolong copper-gold district is located in the western Bangong-Nujiang metallogenic belt, which hosts several large and super-large porphyry-epithermal Cu (Au) deposits. However, whether there are independent epithermal gold deposits in this region is not only a major scientific issue but also a key direction for exploration. In this study, we systematically investigated the size,

http://www.kcdz.ac.cn/

* 本文得到国家自然科学基金(编号:42172100)、自然资源部杰出青年人才项目(编号:KY-BR-XZ-202006)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号:KK2102)联合资助
第一作者简介 孙 豪,男,1995年生,博士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: haosun182@163.com
** 通讯作者 宋 扬,男,1983年生,研究员,博士生导师,主要从事资源勘查学研究。Email: songyang100@126.com
收稿日期 2022-05-21;改回日期 2023-02-12。秦思婷编辑。

morphology, core trace elements and opaque mineral inclusions signatures of 746 placer gold grains collected from eluvium and alluvium in the Gaerqin ore area, by using the super-depth-of-field high-resolution digital microscope, the scanning electron microscope and the electron microprobe. The results show that the placer gold grains are not formed by biochemistry or chemical processes in the supergene environment, but are the products of the denudation of the gold ore bodies in the Gaerqin ore area. The characteristics of placer gold grains include generally high Bi, extremely low Cu, and partly high Hg, Te, as well as Ag varying greatly (0.05%~40.21%), a wide range of fineness (588~999), together with abundant Bi-Pb-Te-S opaque mineral inclusions, indicate that an epithermal gold deposit may be developed in the Gaerqin ore area.

Key words: geochemistry, placer gold, gold deposit, epithermal, Duolong, Tibet

西藏地处青藏高原腹地，构造运动活跃，物质循环显著，成矿地质条件优越，西南三江、冈底斯、北喜马拉雅、班公湖-怒江四大成矿带汇聚于此，是中国最重要的资源储备及开发基地之一（唐菊兴等，2017; 2019）。已有的研究资料及找矿实践表明，金是西藏地区的优势矿种之一（冯孝良等, 1999; 秦克章等, 2007; 唐菊兴等, 2014a; 2014b; 2016; 宋扬等, 2014; 李永灿等, 2017; 李光明等, 2021），广泛分布的砂金也昭示着西藏地区具有金矿找矿的广阔前景。然而，当前西藏已发现的金资源多为砂金或斑岩-矽卡岩-浅成低温热液型铜金矿等矿床中的伴生金，而独立的岩金矿较少，尤其是浅成低温热液型金矿床仍鲜有报道。作为全球最优越的金成矿地域之一，中国西藏是否产出独立的浅成低温热液型金矿，成为业内学者广泛关注的焦点。

多龙矿集区是寻找浅成低温热液型金矿床的重要远景区之一（秦克章等, 2007; 唐菊兴等, 2014a; 2014b），目前在区内已发现众多斑岩-浅成低温热液型铜（金）矿床（点）。其中，尕尔勤矿床位于多龙矿集区东部，与其他矿床（点）不同的是，该矿床下游不远处发育有藏北著名的恰秋沟砂金矿，矿床地表还见有富金的多孔状硅帽（方向等，2014）。据此，唐菊兴等（2014b）依据“缺位找矿”理论预测尕尔勤是浅成低温热液型金矿床的进一步勘查评价区。此外，岩石地化剖面和短波红外光谱测量也显示，在尕尔勤矿区具有形成浅成低温热液型铜金矿的潜力（张志等，2017）。然而，由于矿区岩石露头较差，冲积物、残坡积物覆盖较厚，地表矿化蚀变不明显等勘查难点的存在，综合研究程度较低，尕尔勤矿区是否存在浅成低温热液型金矿仍不明确，矿区内广泛分布的砂金来源也尚不清楚，极大地阻碍了尕尔勤矿区乃至整个多龙矿集区的下一步勘查部署。

宋扬等（2021）和孙豪等（ 2021）对多龙矿集区内砂金的数量和形貌已开展了初步的研究工作，结果显示砂金与区内矿床在空间位置上存在紧密联系。鉴于上述科学问题，本文进一步对尕尔勤矿区残坡积物和外围水系沉积物中的砂金的大小、形貌及微区地球化学特征进行系统的研究，旨在查明砂金与尕尔勤矿区成因联系的基础上，试图通过砂金微区地球化学特征对尕尔勤矿区可能存在的金矿化类型进行进一步的限定。本研究不仅可以深化对多龙矿集区成矿作用的认识，指导区域找矿，同时，也可为其他类似地区金矿床类型的厘定以及砂金物质来源研究提供一种思路。

1 地质背景

1.1 多龙矿集区

班公湖-怒江缝合带横贯于青藏高原中部，西起班公湖，向东沿怒江延伸至滇西境内，其主体东西展布近两千多公里，是青藏高原最主要的缝合带之一（图 1a）。广义的班公湖-怒江成矿带范围包括班公湖-怒江缝合带及缝合带北侧羌塘地体南缘、南侧拉萨地体北部广大区域，带内发育众多与班公湖-怒江洋盆俯冲-消减-闭合-碰撞构造旋回相关的斑岩型、矽卡岩型、造山型等铜金铁钨成矿作用及岩浆岩（宋扬等，2014）。

多龙矿集区地处羌塘地体南缘，班公湖-怒江缝合带北侧，为班公湖-怒江洋北向俯冲作用的产物（祝向平等, 2015; Geng et al., 2016; 唐菊兴等, 2016; 宋扬等, 2019）。作为班公湖-怒江成矿带率先取得的斑岩铜矿找矿突破的矿集区（曲晓明等, 2006），截至目前，多龙矿集区已探获包括铁格隆南、波龙、多不杂、拿若、拿厅 5 个大型-超大型铜（金）矿床，地堡那木岗、拿顿、尕尔勤 3 个中-小型铜（金）矿床和色那、赛角、铁格山等数个铜（金）矿化点（图 1b），整体

http://www.kcdz.ac.cn/

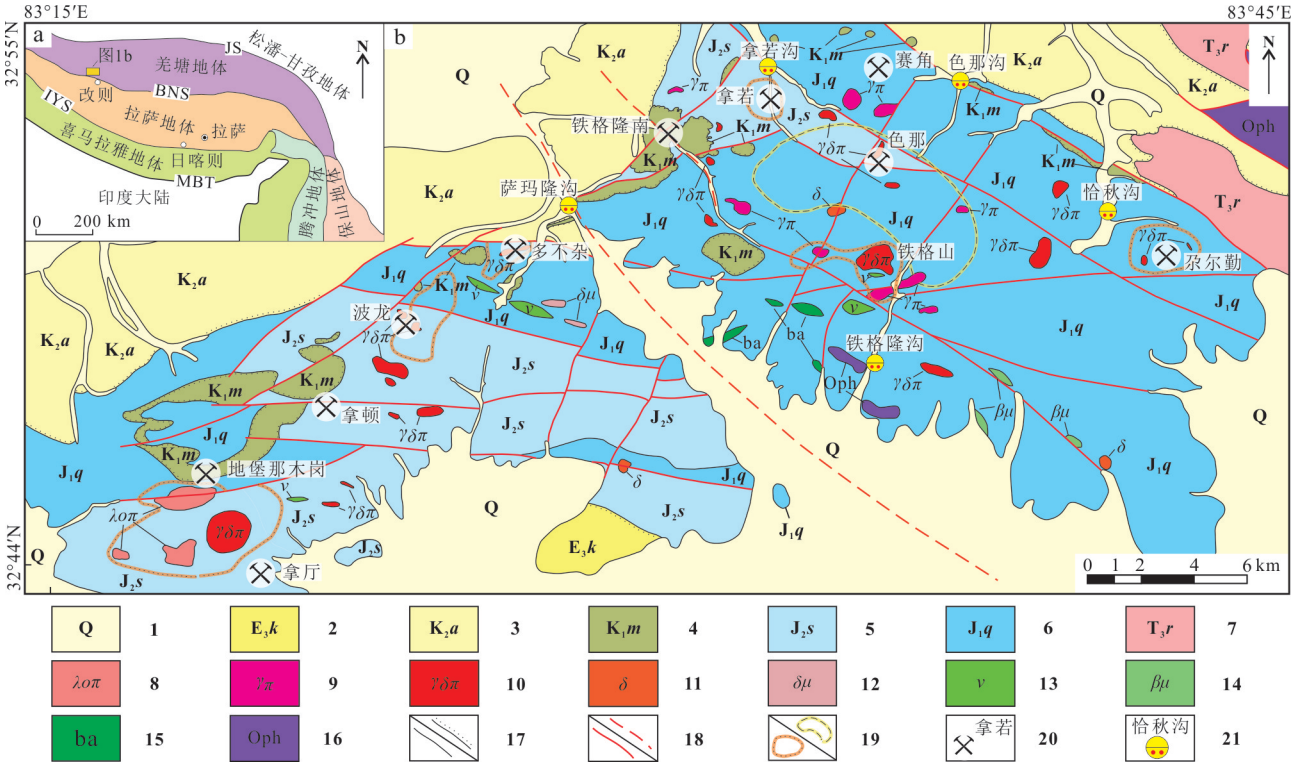

图 1　多龙矿集区大地构造位置示意图(a)和区域地质简图(b)(修改自王勤等,2019)

1—第四系;2—上渐新统康托组砾岩、含砾砂岩、砂质泥岩;3—上白垩统阿布山组砾岩、含砾砂岩;4—下白垩统美日切错组安山岩、英安岩、火山碎屑岩;5—中侏罗统色哇组砂岩、粉砂岩;6—下侏罗统曲色组砂岩、粉砂岩;7—上三叠统日干配错组灰岩;8—石英斑岩;9—花岗斑岩;10—花岗闪长斑岩;11—闪长岩;12—闪长玢岩;13—辉长岩(脉);14—辉绿岩(脉);15—玄武岩(脉);16—蛇绿混杂岩;17—地质界线(整合/不整合);18—断层(实测/推测);19—蚀变范围(泥化/角岩化);20—矿区位置及名称;21—砂金矿位置及名称

JS—金沙江缝合带;BNS—班公湖-怒江缝合带;IYS—印度-雅鲁藏布江缝合带;MBT—主边界逆冲断裂

Fig. 1　The tectonic setting (a) and regional geological map (b) of the Duolong ore district (modified from Wang et al., 2019)

1—Quaternary; 2—Upper Oligocene Kangtuo Formation conglomerate, pebbly sandstone and sandy mudstone; 3—Upper Cretaceous Abushan Formation conglomerate, pebbly sandstone; 4—Lower Cretaceous Meiriqiecuo Formation andesite, dacite and volcaniclastic rock; 5—Middle Jurassic Sewa Formation sandstone and siltstone; 6—Lower Jurassic Quse Formation sandstone and siltstone; 7—Upper Triassic Riganpeicuo Formation limestone; 8—Quartz porphyry; 9—Granite porphyry; 10—Granodiorite porphyry; 11—Diorite; 12—Diorite porphyry; 13—Gabbro (dyke); 14—Diabase (dyke); 15—Basalt (dyke); 16—Ophiolitic mélange; 17—Geological boundary (comformity/uncomformity); 18—Fault (measured/inferred); 19—Alteration zone (argillation/hornfel); 20—Deposit location and name; 21—Placer gold deposit location and name

JS—Jinsha suture; BNS—Bangong-Nujiang suture; IYS—Indus-Yarlung Zangbo suture; MBT—Main boundary thrust

http://www.kcdz.ac.cn

产出一套类似于南美安第斯成矿带俯冲背景下的陆缘弧环境有关的斑岩-浅成低温热液-隐爆角砾岩筒型铜(金)矿床组合(唐菊兴等, 2017)。已有的成岩成矿年代学资料表明,多龙矿集区内的成矿作用集中发生在早白垩世(约 120 Ma),主要与同时期的花岗闪长斑岩、石英斑岩、石英闪长玢岩等中酸性浅成-超浅成侵入岩有关(佘宏全, 2009; 祝向平, 2011; 方向等, 2015; 林彬等, 2019)。成矿后,羌塘地体南缘隆升,使得区内部分矿体遭受剥蚀,随后火山活动爆发,形成的中基性陆相火山岩覆盖地表,尔后继续接受剥蚀,形成了独具特色的火山岩在上、浅成低温热液叠加斑岩型矿体居中、斑岩型矿体在下的“铁格隆南式”矿床(图 2)(唐菊兴等, 2014b; 宋扬等, 2017; Song et al., 2018)。铁格隆南矿床的发现,预示着矿集区内具有寻找斑岩-浅成低温热液型铜金矿、浅成低温热液型金矿床的潜力。

多龙矿集区主体地层由中生界海相沉积上三叠统日干配错组碳酸盐岩夹碎屑岩、下侏罗统曲色组、中侏罗统色哇组碎屑岩组成,之上覆有下白垩统美日切错组陆相中基性火山岩、上白垩统阿布山组磨拉石建造、上渐新统康托组山间盆地沉积和第四系残坡积物、冲洪积物,总体反映了一套由浅海向陆内

演化的沉积序列，与早白垩世晚期羌塘地体南缘的隆升事件相对应（宋扬等, 2017）。其中，美日切错组角度不整合覆盖在矿体之上形成保护盖层，是区内部分矿床的浅部矿体仍能保存至今的重要原因（唐菊兴等，2014b; 2016; 宋扬等，2017; Song et al., 2018; Yang et al., 2020）。

多龙矿集区位于扎普-多不杂岩浆弧东段，岩浆活动强烈，时间集中在侏罗纪—早白垩世。其中，侵入岩包括近东西向分布的呈岩墙或岩脉形式产出的辉长岩、辉绿岩等基性岩和矿集区内普遍发育的呈岩株、岩瘤或岩脉形式产出的花岗闪长斑岩、石英斑岩、花岗斑岩、石英闪长玢岩、闪长岩等中酸性-酸性浅成-超浅成岩，区内成矿主要与中酸性侵入岩有关。火山岩略晚于侵入岩出现，主要为一套玄武岩-玄武安山岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合，主体沿区内北东向或北西向断裂分布，是成矿期后火山活动的产物。

矿集区构造具有多期次活动特征，整体由北东向、北西向和近东西向3组主断裂构成菱形构造格架（图1b）。其中，北东向断裂为区内主要的控岩-控矿构造，多数含矿斑岩和矿床（点）沿此断裂大致呈北东向分布；近东西向断裂规模大，活动时间长，与北东向断裂的交汇处常是矿床和岩体的有利就位部位；北西向断裂形成时间较晚，主要为成矿期后构造，对区内部分矿体具有破坏作用。

1.2 尕尔勤矿区地质

尕尔勤铜（金）矿区位于多龙矿集区东部（图1b），是矿集区内最早确定的一批矿区之一。1998年学者们根据下游发育的恰秋沟砂金矿以及地表出露的黄铁矿化石英脉，认为尕尔勤地区存在岩金成矿的可能，到2012年在斑岩体出露区进行少量探矿工程，以查证矿区是否存在工业铜（金）矿体，尕尔勤矿区经历了从金矿找矿到铜（金）找矿思路的转变。然而，由于揭露的铜金矿体矿化不连续，品位低，已有的勘探工程施工较浅，矿（化）体深部地质特征不明，已有资料综合研究程度较低等原因，至今未有大的找矿突破。

矿区内地层出露简单（图3），上三叠统日干配错

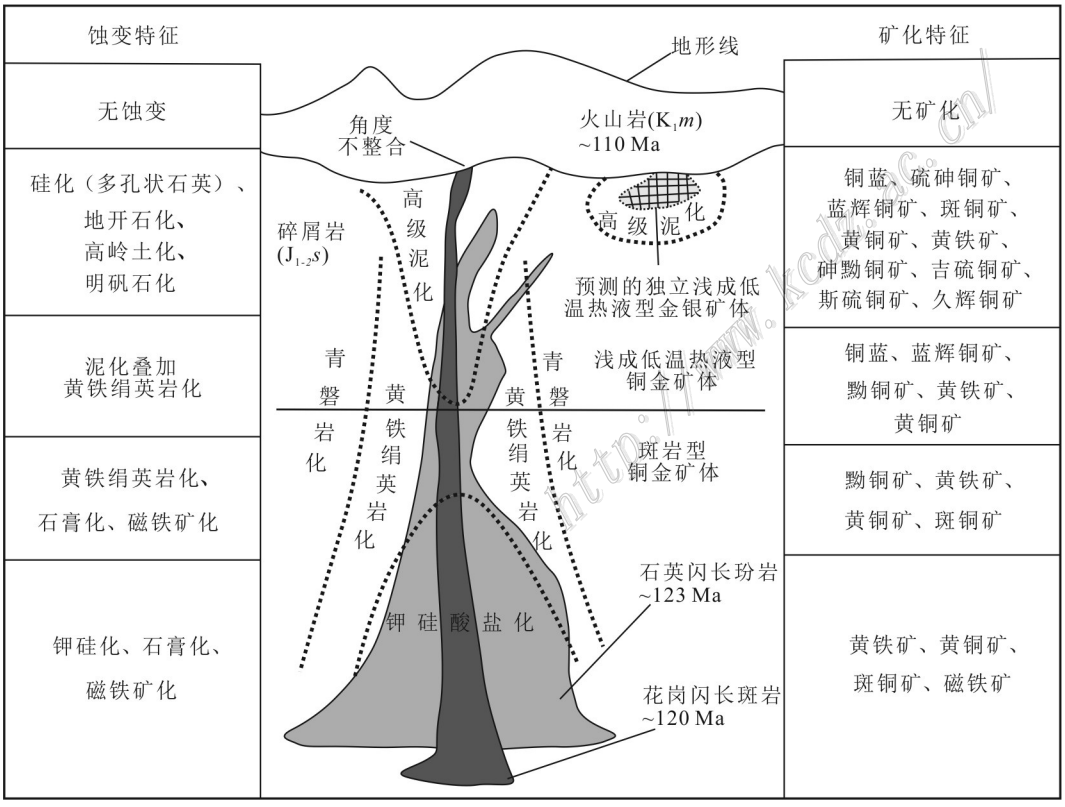

图 2 多龙矿集区铁格隆南斑岩-浅成低温热液型铜金矿床特征（修改自唐菊兴等, 2014b）

Fig. 2 The characteristics of the Tiegelongnan porphyry and epithermal Cu (Au) deposit in the Duolong ore district (modified from Tang et al., 2014b)

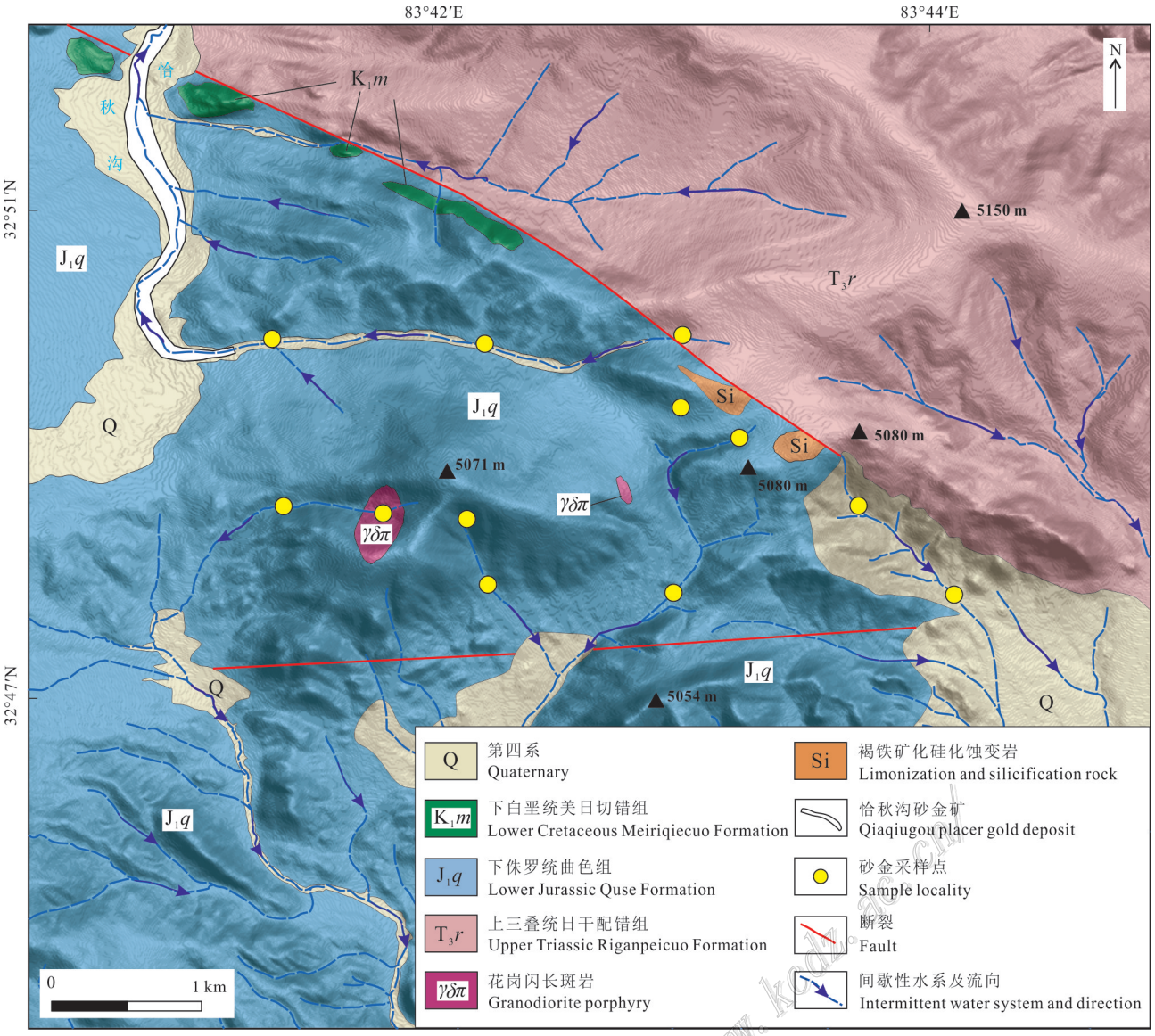

图 3　尕尔勤矿区地形地质简图

Fig. 3　Schematic topography and geological map of the Gaerqin ore area

组灰岩局限于矿区东北角,与下侏罗统曲色组碎屑岩呈断层接触,下白垩统美日切错组陆相中基性火山岩不整合覆盖于曲色组之上,在矿区北侧呈串珠状分布,出露范围有限。第四系为残坡积物、洪冲积物,主要沿沟谷、缓坡地带分布。值得注意的是,藏北著名的恰秋沟砂金矿在尕尔勤矿区下游不远处发育,经前期调查,该砂金矿成因类型为冲洪积型,初步探求的砂金资源量超过 2 t,达到中型规模,预示着尕尔勤矿区可能存在一个遭受过剥蚀的岩金成矿系统。

矿区构造以断裂构造为主,在岩体侵入部位,曲色组砂岩地层产状发生明显变化,形成穹隆构造。断裂构造见北西向和近东西向 2 组(图 3),北西向断裂展布于矿区北东侧,走向大致为 310°,断层面倾向北东,倾角 40°左右,是上三叠统日干配错组和下侏罗统曲色组接触界线。近东西向断裂展布在矿区中部,断裂东端北侧地表见有黄褐色、紫红色角砾状或致密块状强褐铁矿化多孔状硅帽,镜下观察和短波红外光谱测试显示,蚀变岩中含有大量赤铁矿和少量高岭土、地开石、绢云母等矿物,暗示着岩石的形成与氧化的酸性流体有关。

矿区残坡积物覆盖较厚,岩浆岩出露有限,仅在矿区中部沟谷和东部缓坡处见有小规模花岗闪长斑岩(图 3)。中部花岗闪长斑岩体呈近椭圆形岩株产出,东部岩体以岩脉形式产出,两者均侵位于曲色组

http://www.kcdz.ac.cn/

碎屑沉积岩中。地表出露的花岗闪长斑岩高岭土化、黄铁矿化、褐铁矿化、绢云母化较发育。岩石地化分析结果显示，尕尔勤矿区的花岗闪长斑岩属于钙碱性岩石系列，与壳源岩浆特征一致（方向等，2013）；锆石U-Pb年龄结果显示，花岗闪长斑岩侵位于早白垩世（(124.4±0.4)Ma）（张志等，2017）。考虑到与多龙矿集区多不杂、波龙等斑岩型铜金矿成矿地质背景的相似性，2012年对岩体出露区实施了少量探矿工程，但由于施工深度较浅，揭露的含铜矿体厚度较小，矿化不连续，品位较低等，勘查思路尚不明确，目前尚未有大的进展，暗示尕尔勤地区的成矿、储矿条件与多龙其他铜金矿区可能有所不同。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

本研究以尕尔勤矿区残坡积物及外围水系沉积物中的砂金为研究对象。针对研究区高寒缺氧、常年性流水缺乏等特点，对砂金采样方法进行了相应设计，具体采样步骤如下：

基于遥感卫星数据，分析尕尔勤矿区地形及水系分布特征；根据地形及水系分布情况，结合地表地质特征，布设重砂采样点；利用圆筒筛将采样粒径固定在8 mm以下(考虑到可能存在的粉砂级别砂金颗粒，野外不控制细粒级的样品粒径)，根据样品的含水情况控制单个样重12~15 kg（保证样品在自然风干后能够统一称量至10 kg）。每个样品自然风干、混合均匀后，统一称量至10 kg用于砂金分选提纯，具体砂金分选方法参照（中国地质科学院地矿所，1977）。本次共从尕尔勤矿区12个采样点中分选出746颗砂金，具体砂金采样位置见图3。

2.2 分析方法

砂金形貌分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。具体分析步骤：利用双面胶将砂金颗粒按大小排列并安装在玻璃板上，在超景深高分辨率数码显微镜（Olympus DSX-1000）下，以砂金形状分类卡（Barrios et al., 2015）为参照，将砂金的磨圆度分为圆状、中等圆状及棱角状3类进行观察统计，并测量颗粒的三维长度（长轴长（L）、短轴长（W）以及厚度（T），三者两两垂直）。此外，利用飞纳能谱扫描电镜（Phenom XL）对砂金颗粒的微形貌进行观察分析，识别砂金颗粒表面擦痕、坑洞、矿物印模以及夹杂物等微观形貌特征。

三维数据可用来计算砂金颗粒的各种形状参数，以评估砂金颗粒的搬运距离（dos Santos Alves et al., 2020）。笔者重点选择了Cailleux扁平度指数（CFI）、Shilo扁平度指数（Shilo）以及Krumbein球度（Φ）3种形状参数对尕尔勤矿区砂金的搬运距离进行了分析。相关参数的具体计算方法如表1所示；数据统计分析由Origin（2021）软件完成。

形貌分析后，将砂金冷镶嵌制靶，用于电子背散射图像（BSE）、能谱（EDS）和电子探针（EPMA）分析。电子背散射和能谱分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室采用荷兰生产的飞纳能谱扫描电镜（Phenom XL）完成，用于砂金内部结构分析及矿物包体识别。电子探针（EPMA）分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室完成，主要用于砂金主要元素成分分析，部分矿物包体识别结果也由电子探针进行了验证，仪器型号为日本JOELJXA-iHP200F，测试条件为：加速电压20 kV、束流20 nA、束斑1~5 μm。

所测元素用的标准物质分别为：FeAsS（As）、ZnSe（Se）、GeS（Ge）、Ag（Ag）、SbS（Sb）、PbS（Pb）、Te（Te）、FeS_2（S）、HgS（Hg）、Bi_2S_3（Bi）、Ni（Ni）、ZnS（Zn）、Au~Ag（Au）、Au~Ag~Cu（Cu）、FeS_2（Fe）、Co（Co）。所测元素检测限分别为：w（As）：(290~304)×10^{-6}、

表1 Cailleux扁平度指数、希洛平坦指数和Krumbein球度参数计算方法

Table 1 Calculation method of the Cailleux flatness index, Shilo flatness index and Krumbein sphericity

形状参数名称	计算公式	描述	资料来源
扁平度指数（CFI）	$CFI=(L+W)/2T$	用来评估可塑性颗粒在河流搬运过程中质量再分配状况，值越大表明颗粒越扁平，变化范围为[1，∞)	Cailleux et al., 1959
Shilo 扁平度指数（Shilo）	$Shilo=[(L+W)/2T]-1$	该指数与CFI指数类似，值越大表明颗粒扁平度越高，变化范围为[0，∞)	Shilo et al., 1970
Krumbein 球度（Φ）	$\Phi=\sqrt[3]{(WT/L^2)}$	用来描述颗粒接近理想球形的程度，值越大表示颗粒球度越高，变化范围为(0，1]	Krumbein, 1941

注：L—颗粒长轴长；W—颗粒短轴长；T—颗粒厚度。

w(Se)：(353~363)×10^{-6}、w(Ge)：(185~203)×10^{-6}、w(Ag)：(163~165)×10^{-6}、w(Sb)：(188~192)×10^{-6}、w(Pb)：(444~464)×10^{-6}、w(Te)：(168~172)×10^{-6}、w(S)：(85~102)×10^{-6}、w(Hg)：(1035~1454)×10^{-6}、w(Bi)：(420~495)×10^{-6}、w(Ni)：(308~321)×10^{-6}、w(Zn)：(421~458)×10^{-6}、w(Au)：(513~539)×10^{-6}、w(Cu)：(208~218)×10^{-6}、w(Fe)：(188~191)×10^{-6}、w(Co)：(191~198)×10^{-6}。

3　分析结果

3.1　砂金形貌特征

本次对尕尔勤矿区12个采样点位的重砂样品进行了砂金分选提纯，结果显示，尕尔勤矿区砂金产出尤为丰富，采样点普遍检出了砂金，共计746颗，检出率达到了6.2颗/kg。

746颗砂金的形貌观察统计结果显示，尕尔勤矿区的砂金以中等圆状颗粒（图4a）为主，占比59.8%，其次为圆状砂金（图4b），占比34.2%，角状砂金（图4c）相对少见，占比6.0%。部分颗粒呈规则方形，仍保留有原始晶面（图4d）。砂金表面，矿物印模（共生矿物解离后留下的规则印模）（图4e）及铁氧物、石英（图4f、g）较常见。除少数颗粒外，砂金表面普遍具有不同程度的撞击坑洞和擦痕（图4h），说明绝大部分砂金颗粒都经历了搬运过程。

此外，研究中见有少量具有铋碲化物涂层的颗粒（图4f），通常指示较近的搬运距离（Chapman et al., 2018）。统计发现，除少量的长棒状颗粒表现为不同程度的弯曲外（图4i），没有发现明显折叠加厚的砂金颗粒，颗粒之间也不存在相互“焊接”现象。

3.2　砂金大小及形状特征

本研究对收集的746颗砂金全部进行了三维测量计算，统计结果显示：砂金颗粒大小（以长轴长表示）分布在26.4~1526.7 μm，其中多数在400 μm以下（94.1%），长轴（L）、短轴（W）及厚度（T）的平均值和标准差分别为：L=184.2 μm（137.7）、W=128.4 μm（85.5）、T=51.3 μm（34.1）。

在直方图（图5）中，长轴、短轴及厚度均呈明显的单峰正偏态特征。CFI、Shilo指数和Krumbein球度（Φ）平均值和标准差分别为CFI=3.30（1.23）、Shilo=2.30（1.23）、Φ=0.59（0.09）。由直方图（图5）可见，砂金的Krumbein球度（Φ）基本呈单峰对称分布，而CFI和Shilo与砂金三维一致，呈单峰正偏态分布。

3.3　砂金微区地球化学

本次选择了尕尔勤矿区189颗代表性砂金，对砂金核部分别进行了电子探针分析，电子探针结果见表2。由表2可知，尕尔勤矿区的砂金颗粒普遍含有Ag、Bi，部分含有Hg、Te，而Cu、Sb、As、Se、Fe、Ni、Co、Ge、S则大部分接近或低于检测限值。除Au、Ag、Bi、Hg、Te、Cu外，其他元素在文中将不展开讨论。此外，由于样品GEQ174、GEQ175、GEQ176、GEQ177电子探针总量过低，除Cu外，其他数据不参与文中讨论。

分析结果（表2）表明，砂金w(Au)为57.33%~99.90%，平均值90.58%；w(Ag)为0.05%~40.21%，平均值8.43%；相应的金成色为588~999（金成色=[1000×w(Au)/(w(Au)+w(Ag))]。Bi普遍高于检测限，w(Bi)为0.07%~0.90%，平均值0.44%。Hg有35%砂金高于检测限，最大可达1.83%，平均值0.40%；Te有25%砂金高于检测限，最大值达0.15%，平均值0.05%；尕尔勤矿区砂金Cu含量普遍较低，在检测的189颗砂金中，仅有17颗检测到了Cu，其中，仅有2颗高于检测限值（表2）。

采用电子背散射和能谱对砂金内部的不透明矿物包体进行了识别统计，部分利用电子探针进行了验证，统计结果显示，尕尔勤矿区的砂金内部黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、毒砂、辉铋矿、自然铋以及复杂的铅-铋-碲-硫化物等矿物包体较常见，而黄铜矿矿物包体仅在个别颗粒中见到。

4　讨　论

4.1　砂金物质来源

据多龙地区1∶5万区域地质调查结果，多龙矿集区成矿以来沉积地层主要见：下白垩统美日切错组，为一套陆相中基性火山岩；上白垩统阿布山组，由干旱条件下的一套山前冲洪积相组成；新近系渐新统康托组，为干旱条件下山麓洪积扇、河流、湖泊相沉积；第四系，主要由冲积、冲洪积、湖积和湖沼堆积相组成。此外，区域地质调查显示矿集区内无U型谷、羊背石、冰川漂砾等典型冰川地貌特点。由此可见，多龙矿集区并没有出现冰川活动的证据。尕尔勤矿区位于多龙矿集区东部，沉积物采样分析表明，含金层中砾石成分主要为砂岩、中基性火山岩、脉石英和灰岩等，总体与多龙矿集区内出露的地质体相符，没有与矿集区内岩石成分显然不符的砾石

http://www.kcdz.ac.cn

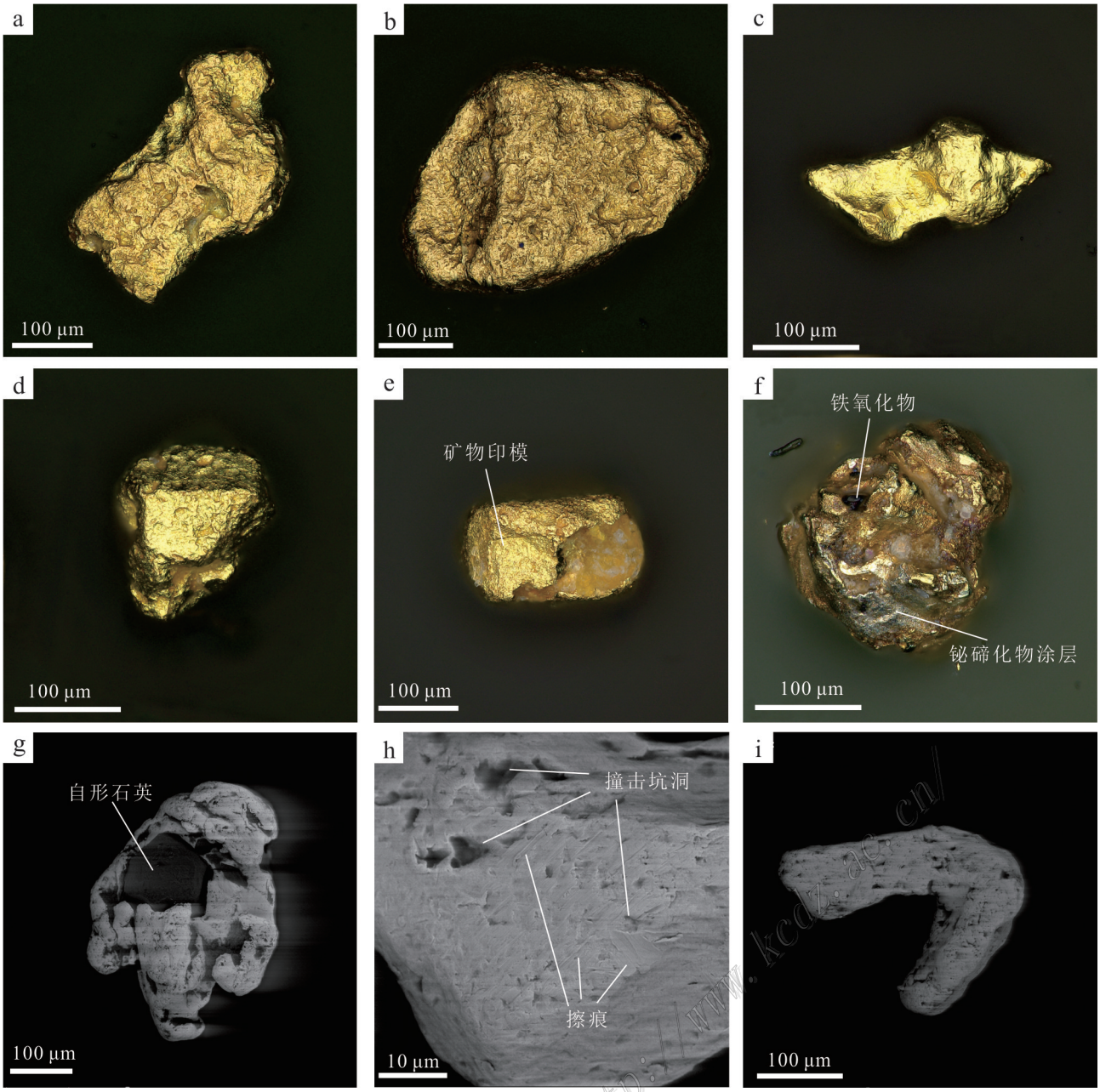

图4 尕尔勤矿区砂金典型形貌特征

a. 中等圆状砂金；b. 圆状砂金；c. 角状砂金；d. 保留原始晶面的砂金；e. 保留矿物印模的砂金；f. 砂金表面的铁氧化物和铋碲化物；g. 含自形石英的砂金（BSE）；h. 砂金表面撞击坑洞和擦痕（BSE）；i. 弯曲的长棒状砂金（BSE）

Fig. 4 Example micromorphology for placer gold grains from the Gaerqin ore area

a. Intermediate rounded particle; b. Rounded particle; c. Angular particle; d. Gold particle with primary crystal faces; e. Gold particle with mold left by associated minerals; f. Gold particle with Iron oxide and Bi telluride on surface; g. An enhedral quartz is encased in gold particle (BSE); h. Detail of the abrasion marks and scratches on the gold particle surface (BSE); i. Curved rodlike gold particle (BSE)

组成。此外，宋扬等（2021）对多龙矿集区内的砂金数量分布进行了半定量统计分析，发现矿集区内的砂金明显受独立的流域系统控制。综合以上证据，尕尔勤矿区内的砂金应为间歇性流水搬运堆积形成，而不是冰川远源搬运的产物。

已有的研究表明，在表生环境下，由生物化学或化学作用主导的溶解再沉淀过程也能形成自然金（Watterson, 1992; Youngson et al., 1995; Shuster et

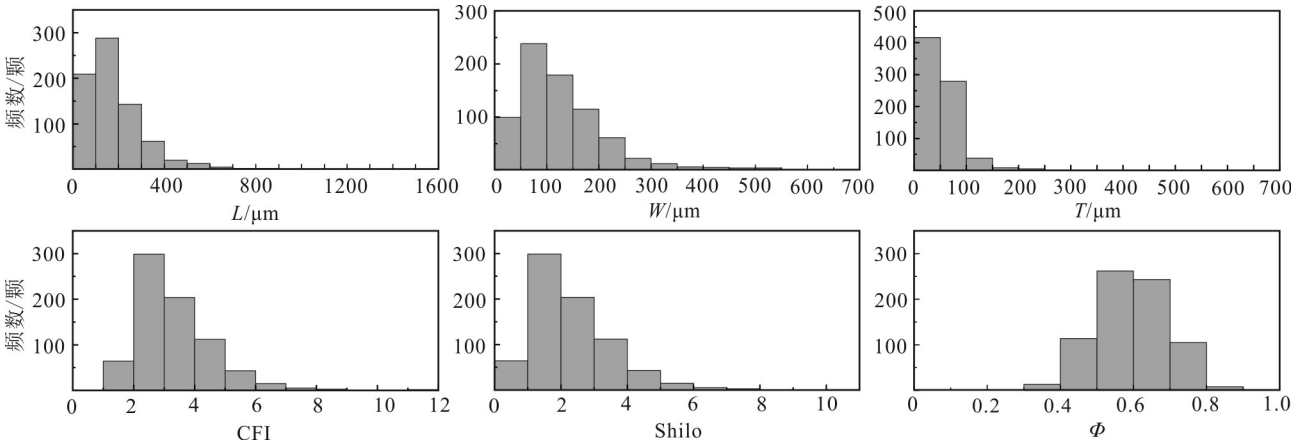

图5　尕尔勤矿区砂金三维及形状参数分布直方图

Fig. 5　Histograms of particle dimensions and shape index for placer gold grains from the Gaerqin

al., 2015; Reith et al., 2010; 2018; Cabral et al., 2021)。理论上，这种在表生环境中由生物化学或化学作用形成的金颗粒经过流水的搬运改造也可以形成“砂金”(下文称自生金)。然而，自生金通常以异常高的纯度(Ag含量 < 1%)以及特殊的形貌结构(例如多孔状、葡萄状、蕨类叶片状、三角形或六边形板状等)与剥蚀来源的砂金相区别(Bowell, 1992; Freyssinet et al., 2005; Hough et al., 2009; McClenaghan et al., 2011; Butt et al., 2020)。

首先，本次系统研究了尕尔勤矿区746颗砂金的形貌特征，没有发现自生金所具有的特殊形貌结构。其次，微区成分结果表明，在尕尔勤矿区，尽管部分砂金发育有高度富Au的环边(Ag < 1%)(图6a~c)，暗示着上述自生金形成过程可能确实存在，但环边的厚度普遍较薄(绝大多数小于20 μm，极少数颗粒达到50 μm但仍保留有核部(图6b)，砂金核部Ag含量普遍较高(表2, 图6a、b、d、e)，说明自生金即使存在，对砂金的整体贡献也极小，这与国际上有关的大量研究报道相一致(Knight et al., 1999a; 1999b; Hough et al., 2009; Chapman et al., 2000a; 2000b; 2010a; 2010b; Moles et al., 2013; Lalomov et al., 2017; Alam et al., 2019; dos Santos Alves et al., 2020; Ketchaya et al., 2022)。此外，Te的富集通常与岩浆成分有关(Thompson et al., 2000; Chapman et al., 2006)，本次砂金核部成分和不透明矿物包体组成均显示，研究区内的砂金具有明显的Te异常，这进一步表明尕尔勤矿区的砂金颗粒不是表生环境下形成的，而与深部过程有关。

综上可知，尕尔勤矿区的砂金既不是冰川远源搬运的产物，也不是表生环境下生物化学或化学成因金，而是含金矿体在地表长期暴露、风化、剥蚀，由间歇性流水搬运沉积后的产物。

4.2　砂金与尕尔勤矿区的关系

如上所述，研究区的砂金是金矿(化)体剥蚀成因，而且形成于间歇性流水冲积环境中。前人研究表明，自然金是一种硬度低、延展性强的金属，剥蚀进入冲积环境后，金颗粒的形貌将随着搬运距离的增加而发生规律性变化(Knight et al., 1999a; Townley et al., 2003)，因此，可以依据砂金的形貌变化特征对砂金的搬运距离作出合理的推测(Barrios et al., 2015; Lalomov et al., 2017; dos Santos Alves et al., 2020; Ketchaya et al., 2022)。

在搬运过程中，锤击和磨损是影响砂金形貌的主要因素(Knight et al., 1999a)，随着搬运距离的增加，锤击和磨损效应不断积累，砂金的扁平度和磨圆度将迅速增加(Herial et al., 1990; Knight et al., 1999a; Townley et al., 2003; Barrios et al., 2015)。研究结果显示，尕尔勤矿区的砂金，CFI均值3.30，Φ均值0.59，可见砂金整体具有一个低的扁平度值和高的Krumbein球度值，这说明尕尔勤矿区的砂金受到的锤击累积效应较低，扁平度较小，运输距离较短。

Knight等(1999a)对加拿大育空高原西部Klondike地区21个岩金矿床和36个砂金矿床中的近2700颗砂金的扁平度和磨圆度与搬运距离的关系进行了全面而细致的研究，通过砂金的扁平度与离源距离的变化关系，建立了Shilo指数(均值)与砂金搬运距离的半定量模型。研究还表明，当砂金搬运距离大于3 km时，砂金磨圆度将达到最大值而且在随

http://www.kcdz.ac.cn/

表 2 尕尔勤矿区砂金电子探针数据（W_B/%）

Table 2 Electron probe microanalysis (EPMA) data of placer gold grains from the Gaerqin ore area（W_B/%）

样品号	As	Se	Ge	Ag	Sb	Pb	Te	S	Hg	Bi	Ni	Zn	Au	Cu	Fe	Co	总和	成色
GEQ001	0	DL	0	5.03	0	0	DL	DL	DL	0.30	DL	0	94.79	0	0	DL	100.12	950
GEQ002	DL	DL	DL	1.00	0	0	0	0	DL	0.27	0	0	98.98	0	DL	0	100.26	990
GEQ003	0	DL	DL	11.11	DL	0	0	0	0.19	0.41	0	0	87.51	0	0	0	99.22	887
GEQ004	0	DL	0	1.04	0	0	DL	0	0	0.38	0	0	98.90	DL	0	0.02	100.36	990
GEQ005	0	DL	0	6.18	0	0	DL	0	DL	0.30	0	0	92.89	0	0	0.03	99.40	938
GEQ006	0	0	DL	5.76	0.03	0	0	0	DL	0.22	DL	0	93.59	0	0	0.02	99.64	942
GEQ007	DL	DL	DL	6.18	0	0	0	0	0.23	0.26	0.03	0	92.85	0	0	0	99.55	938
GEQ008	0	0	DL	20.72	0	0	0	DL	DL	0.34	DL	0	79.62	0	0	0.03	100.70	794
GEQ009	DL	0	0	0.79	0	0	0	0	DL	0.35	0	0	98.96	DL	0	0	100.12	992
GEQ010	DL	0	DL	3.60	0.02	0	0	0	0	0.49	0	0	97.00	0	DL	DL	101.11	964
GEQ011	0	DL	DL	6.22	0	0	0.14	0	DL	0.51	DL	0	93.62	0	0	0	100.48	938
GEQ012	DL	DL	0	5.00	0.02	0	0	0	0	0.57	0	0	95.54	0	DL	0	101.13	950
GEQ013	0	0	0	8.59	0	0	0	0	DL	0.19	0	0	91.22	0	0	0	99.99	914
GEQ014	DL	0	0	8.57	0.04	0	0.10	0	DL	0.27	0	0	91.05	0	0	0	100.03	914
GEQ015	0	0.04	0.03	6.48	0	0	0	0	DL	0.34	0	0	93.50	0	0	DL	100.39	935
GEQ016	0	DL	DL	4.39	0	0	0	0	DL	0.27	DL	0	95.36	0	0	0	100.03	956
GEQ017	0	DL	0.04	4.73	0	0	0.04	0	DL	0.27	0	0	95.03	DL	0	0	100.13	953
GEQ018	DL	0	0	0.43	0	0	0	0	0	0.29	0	0	99.79	DL	0	DL	100.53	996
GEQ019	0	DL	DL	6.35	0	0	0	0	DL	0.30	DL	0	94.10	0	0	0	100.75	937
GEQ020	0	DL	0	5.87	0	0	0	0	DL	0.31	0	0	93.21	DL	0	0	99.41	941
GEQ021	0	0	0	2.26	0	0	0	DL	0.18	0.41	0	0	97.79	0	0	0	100.64	977
GEQ022	0	DL	0.04	5.01	0	0	0.02	0	DL	0.25	DL	0	95.26	0	DL	0.02	100.60	950
GEQ023	0	0	0	4.76	0	0	0	0	DL	0.28	DL	0	94.55	0	0	0	99.59	952
GEQ024	0.03	DL	0	5.81	0	0	0	0	DL	0.36	0	0	94.34	0	0	0	100.55	942
GEQ025	0	0	0	9.63	0	0	0	0	0.21	0.19	DL	0	89.62	0	0	0	99.65	903
GEQ026	0	0	0	13.36	0	0	0	0	0.36	0.44	DL	0	85.71	0	DL	0	99.87	865
GEQ027	0	0	0	5.99	0	0	0.03	0	0.17	0.20	0	0	94.22	0	0	0	100.60	940
GEQ028	DL	DL	0	5.05	0	0	DL	0	0	0.68	0	0	94.02	0	DL	0	99.75	949
GEQ029	DL	0	0.05	5.50	0	0	0	0	0	0.65	0	0	92.80	0	0	DL	98.99	944
GEQ030	0	DL	0	12.04	DL	0	DL	0	0	0.63	DL	0	87.34	0	0	0	100.00	879
GEQ031	0	DL	0.03	17.09	0	0	DL	0	0	0.64	0	0	81.97	0	0	0	99.73	827
GEQ032	0	0	0	1.33	0	0	DL	0	0	0.85	0	0	98.59	0	0	DL	100.76	987
GEQ033	DL	DL	0	6.45	0	0	0	0	0	0.69	0	0	93.06	0	0	0	100.19	935
GEQ034	0	DL	0	11.87	0	0	0	0	0.64	0.45	DL	0	87.71	0	0	0	100.67	881
GEQ035	0.04	0	0	5.16	0	0	0	0	0	0.66	DL	0	95.03	0	0	0	100.89	948
GEQ036	0	0	0	2.51	DL	0	0	0	DL	0.60	DL	0	97.47	0	DL	0	100.58	975
GEQ037	0	0	DL	0.32	DL	0	DL	0	0	0.67	0	0	99.65	0	0	0	100.64	997
GEQ038	0	0	0.03	0.65	DL	0	0	0	DL	0.61	DL	0	99.56	DL	0	0	100.84	994
GEQ039	DL	0.04	0.04	6.12	0	0	0.03	DL	DL	0.55	0	0	93.73	0	DL	0	100.49	939
GEQ040	DL	0	0.02	0.79	0	0	0	0	DL	0.75	0	0	98.95	0	DL	0.02	100.54	992
GEQ041	DL	0	0	10.58	DL	0	DL	0	0.16	0.46	DL	0	88.06	0	0	0	99.26	893
GEQ042	0	DL	0	3.55	0	0	0	0	DL	0.38	0	0	96.56	0	0	DL	100.49	965
GEQ043	0	0	0	4.43	0	0	0	0	0	0.29	DL	0	96.02	0	0	0	100.74	956
GEQ044	0	DL	DL	7.16	0	0	0	0	0	0.48	DL	0	91.81	0	DL	0	99.45	928
GEQ045	0.03	0	0	10.47	0	0	0	DL	0.42	0.37	DL	0	88.25	0	0	DL	99.54	894
GEQ046	DL	0	0	6.86	0	0	DL	0	0	0.26	0	0	92.24	0	0	0	99.36	931
GEQ047	0.03	DL	0	4.01	0	0	0.02	0	DL	0.15	0	0	94.53	0	0	DL	98.75	959
GEQ048	DL	0	0	21.33	0	0	0.06	0	DL	0.28	0	0	76.24	0	0	DL	97.90	781
GEQ049	DL	DL	0	19.50	0	0	0.06	0	0.18	0.30	0	0	79.15	0	0	DL	99.17	802
GEQ050	DL	DL	0	16.04	0	0	0.09	0.01	DL	0.57	0	0	82.39	0	DL	0	99.10	837
GEQ051	DL	0	0	16.88	0	0	DL	0.01	DL	0.60	0	0	82.51	0	0	0	100.00	830
GEQ052	DL	DL	0	10.39	0	0	0	0	0.25	0.53	0	0	89.24	0	0	DL	100.41	896

http://www.kcdz.ac.cn/

续表　2-1

Continued Table　2-1

样品号	As	Se	Ge	Ag	Sb	Pb	Te	S	Hg	Bi	Ni	Zn	Au	Cu	Fe	Co	总和	成色
GEQ053	DL	DL	DL	16.61	0	0	0	0	DL	0.51	0	0	81.37	0	0	0.02	98.51	830
GEQ054	0	DL	0	7.83	DL	0	DL	0	0	0.30	0	0	91.70	DL	0	0	99.82	921
GEQ055	0	0	0	7.60	0	0	0	0	0.18	0.34	0	0.05	92.49	0	DL	0	100.65	924
GEQ056	0	DL	0	18.51	0	0	0	0	0.21	0.27	0	0	80.63	0	0	DL	99.62	813
GEQ057	0	0	0.02	12.52	DL	0	0.05	DL	DL	0.33	0	0	87.35	0	0	0	100.27	875
GEQ058	0	DL	DL	5.86	0	0	0	0.01	0.17	0.44	DL	0	94.02	0	0.02	0	100.52	941
GEQ059	DL	DL	0	30.00	0	0	0.15	0	DL	0.14	0	0	69.02	0	0.02	DL	99.34	697
GEQ060	0	0	0	9.99	0	0	0.03	0	0	0.61	0	0	89.38	0	0	DL	100.00	900
GEQ061	DL	0	0	9.41	0	0	0	0.02	0	0.69	0	0	90.40	0	DL	0	100.53	906
GEQ062	0	0	DL	1.85	0	0	0	0	1.82	0.35	0	0	95.27	0	0	DL	99.29	981
GEQ063	0.06	0	DL	4.35	0	0	0	0	0.95	0.28	0	0	94.38	0	0	0	100.01	956
GEQ064	DL	0	DL	2.01	0	0	0	0	1.63	0.20	DL	0	96.65	0	DL	0	100.48	980
GEQ065	DL	DL	0.03	8.07	0	0	0.06	0	0	0.46	0	0	91.42	0	DL	DL	100.03	919
GEQ066	DL	0	0	6.24	0	0	DL	DL	0.34	0.31	DL	0	93.50	0	0	DL	100.39	937
GEQ067	0	0	0	11.80	0	0	DL	0	0.40	0.25	0	0	87.87	0	0	DL	100.32	882
GEQ068	DL	DL	0	13.37	0	0	0	0	0.30	0.31	0	0	85.67	0	0	0	99.64	865
GEQ069	0	0	0	22.73	0	0	DL	0.02	0	0.72	0.04	0	75.87	0	0	DL	99.37	769
GEQ070	0	DL	0	21.63	0	0	DL	0.02	0	0.59	DL	0	76.89	0	DL	0	99.12	780
GEQ071	DL	DL	0	3.49	0	0	0	0	0	0.81	0	0	96.12	0	0.02	0	100.44	965
GEQ072	0.04	DL	0	1.32	DL	0	0	0	0	0.59	0	0	99.69	0	0	0.03	101.67	987
GEQ073	0	0	0	22.16	0	0	0.02	0	0	0.48	0	0	76.61	0	0	DL	99.28	776
GEQ074	DL	DL	0	10.59	0	0	DL	DL	0	0.67	0	0	88.73	0	0	0	99.99	893
GEQ075	0	0	0.04	0.48	0	0	0	0	0	0.75	0	0	99.01	0	0	0	100.28	995
GEQ076	0	0	0.05	2.50	0	0	0	0	0	0.59	DL	0	97.99	0	DL	0	101.12	975
GEQ077	0	DL	DL	20.24	0	0	DL	0	0	0.67	0	0	78.51	0	0	0	99.41	795
GEQ078	0.04	DL	0	20.03	0	0	DL	0	0	0.70	0	0	78.35	0	0	DL	99.12	796
GEQ079	0	0	0	22.41	0	0	0.05	0.03	0.24	0.65	0	0	76.23	0	0	0	99.61	773
GEQ080	0	DL	0	21.53	0	0	0	0	0	0.46	0.05	0	77.40	0	DL	DL	99.43	782
GEQ081	0	0	DL	10.87	0	0	0	0	0	0.57	0	0	87.55	0	0	DL	98.99	890
GEQ082	DL	0.06	DL	5.46	0	0	0.02	0	0	0.62	0	0	94.71	0	0	0	100.87	945
GEQ083	0	DL	0	14.12	0	0	0	0	0	0.62	0	0	84.48	0	0	DL	99.21	857
GEQ084	DL	DL	DL	22.79	0	0	DL	0	0.31	0.67	DL	0	75.71	0	DL	0	99.48	769
GEQ085	DL	0	0.05	20.46	0	0	0.10	0	0	0.47	0	0	78.64	0	DL	0	99.72	794
GEQ086	0.03	DL	DL	7.96	0	0	0	0	0	0.68	0	0	91.25	0	0	0	99.92	920
GEQ087	0	0	DL	4.61	0	0	0	0	DL	0.86	0	0	95.04	DL	0	DL	100.51	954
GEQ088	0.05	DL	0	15.12	0	0	0.04	0	0.16	0.62	0	0	83.54	0	DL	0	99.52	847
GEQ089	0	0	0	3.01	0	0	0.05	0	0	0.64	0	0	96.53	DL	0	0	100.24	970
GEQ090	0	DL	0	5.60	0	0	0	0	0	0.80	DL	0	94.12	0	0	0	100.53	944
GEQ091	DL	0	0	12.72	0	0	DL	0.18	0	0.71	0	0	87.14	0	0	0	100.74	873
GEQ092	0	DL	0	15.61	0	0	0.05	DL	0	0.58	0	0	82.91	0	0	0	99.14	842
GEQ093	0	0	0	5.72	DL	0	0	0	0	0.73	0	0	94.49	0	0	DL	100.94	943
GEQ094	0	0	0	7.58	0	0	0.03	0	DL	0.62	DL	0	91.61	0	0	DL	99.84	924
GEQ095	0	0	0.03	9.07	0	0	DL	0	0	0.60	0.04	0	90.68	0	0	DL	100.42	909
GEQ096	0	0	0	1.44	0	0	0.03	0	0	0.72	0.03	0	99.20	0	0	0.03	101.45	986
GEQ097	0.03	DL	DL	7.05	0.02	0	0	0	DL	0.39	0	0	92.79	0	0	0	100.28	929
GEQ098	DL	DL	DL	7.00	0	0	0	0	DL	0.33	0	0	92.68	0	DL	0	100.01	930
GEQ099	DL	0	DL	0.27	0	0	0	0	0	0.27	DL	0	99.62	0	0.02	DL	100.18	997
GEQ100	DL	0.05	0	4.72	0	0	0	0	0.25	0.37	0	0	95.01	0.04	0	0.04	100.47	953
GEQ101	0	DL	0	8.22	0	0	0.03	0	DL	0.49	DL	0	91.80	0	0	0	100.53	918
GEQ102	DL	0	DL	7.38	0	0	0.08	DL	0	0.30	0	0	92.56	0	0	0	100.32	926
GEQ103	0	0	0	6.53	0	0	0	0	0.22	0.45	DL	0	93.60	0	DL	DL	100.80	935
GEQ104	DL	0	0.03	9.13	0	0	0	DL	0.20	0.31	0	0	90.08	0	0.04	0	99.79	908

http://www.kcdz.ac.cn/

续表 2-2

Continued Table 2-2

样品号	As	Se	Ge	Ag	Sb	Pb	Te	S	Hg	Bi	Ni	Zn	Au	Cu	Fe	Co	总和	成色
GEQ105	0	0	0	10.75	0	0	0	DL	0	0.41	0	0	88.28	0	0	DL	99.44	891
GEQ106	0	0	0	0.23	0	0	0	0	0.24	0.45	0	0	99.85	DL	DL	DL	100.77	998
GEQ107	0	0	0	7.26	0	0	0	0	DL	0.38	DL	0	92.80	0	0.02	DL	100.46	927
GEQ108	0	0	0	7.56	0	0	0	0	0.25	0.31	0	0	92.31	0	0	0	100.43	924
GEQ109	0	0	DL	5.85	DL	0	0	0	DL	0.43	DL	0	94.38	0	0	0	100.66	942
GEQ110	0	DL	0	15.53	0	0	0	0	0.39	0.25	0	0	83.36	0	0	0	99.53	843
GEQ111	0	0	0	5.41	DL	0	0	0	DL	0.33	0	0	94.16	0	0	0	99.89	946
GEQ112	0	0	0	10.38	0	0	0.06	0	0.41	0.16	DL	0	89.11	0	0	0	100.11	896
GEQ113	0	0	DL	5.42	0	0	0	0	0.68	0.28	0	0	93.88	0	DL	DL	100.27	945
GEQ114	0	DL	0.04	6.78	0	0	0	0	DL	0.27	DL	0	93.46	0	0	0.03	100.58	932
GEQ115	0.06	0	0	0.12	DL	0	0	0	0.86	0.41	0	0	98.32	0	DL	0.02	99.78	999
GEQ116	0	0	0	0.29	0	0	DL	0	0.42	0.40	0	0	99.73	0	DL	DL	100.84	997
GEQ117	0	DL	DL	8.84	0	0	0.03	0	0.50	0.25	DL	0	89.58	0	0	0	99.20	910
GEQ118	DL	DL	0	10.68	0	0	0	0	0	0.58	0	0	88.54	0	0.02	DL	99.82	892
GEQ119	0	0	0	10.47	0	0	0	0	0	0.74	DL	0	87.78	0	0	0	98.98	893
GEQ120	0.04	DL	0	18.70	0	0	0	0.01	0	0.50	0.05	0	80.88	0	DL	DL	100.18	812
GEQ121	DL	DL	0	12.39	0	0	0	0	0	0.62	0	0	87.77	0	DL	DL	100.79	876
GEQ122	DL	DL	0	15.87	DL	0	DL	0	0	0.58	0	0	82.79	0	0	DL	99.24	839
GEQ123	0	0	DL	8.81	0	0	0	DL	0	0.75	DL	0	91.07	0	DL	0	100.63	912
GEQ124	0.03	0	0	8.01	DL	0	0	0	0	0.82	0	0	91.38	0	0.03	DL	100.27	919
GEQ125	DL	0	DL	15.01	0	0	0	0	0	0.54	0	0	84.21	0	DL	DL	99.75	849
GEQ126	0	0	0	4.76	0	0	DL	0	0	0.70	0	0	94.62	0	0	0	100.09	952
GEQ127	0	DL	0	5.31	0	0	DL	0	DL	0.48	0	0	94.57	0	0	0	100.36	947
GEQ128	DL	0	0	10.40	0	0	0	0	DL	0.33	0	0	89.07	0	DL	0	99.80	895
GEQ129	0	DL	DL	13.30	DL	0	0.04	0	0.33	0.45	DL	0	85.01	0	DL	0	99.13	865
GEQ130	DL	0	0.03	5.83	0	0	0.02	0	0.35	0.64	0	0	93.48	0	0	DL	100.35	941
GEQ131	DL	0	0	5.84	0	0	0	0	DL	0.33	0	0	94.06	0	0.03	0	100.25	942
GEQ132	DL	DL	0	5.67	0	0	0	0	0.23	0.38	0	0	93.89	0	0	0	100.17	943
GEQ133	0	0	0	6.28	0	0	0	0	0.34	0.34	0.05	0	93.67	0	0	DL	100.68	937
GEQ134	0	0	0	7.52	0	0	0.04	0	0.28	0.35	0.03	0	92.65	0	0	DL	100.88	925
GEQ135	0	0	0	6.44	0	0	0	DL	0.49	0.31	DL	0	93.10	0	DL	DL	100.34	935
GEQ136	DL	DL	0.02	5.53	DL	0	DL	0	0.30	0.26	0	0	93.87	0	0	DL	99.98	944
GEQ137	DL	DL	0	9.19	DL	0	0	0	0.49	0.25	0	0	90.09	0	0.02	0.03	100.07	907
GEQ138	DL	DL	0.03	6.98	DL	0	0	DL	0.72	0.24	0	0	91.94	0	DL	DL	99.90	929
GEQ139	0	0	0	6.09	0	0	0.03	0	0	0.31	0	0	94.49	0	DL	0	100.92	939
GEQ140	0	DL	0	11.32	0	0	0	0	0	0.26	0	0	87.75	0	0	DL	99.33	886
GEQ141	0	0	0	6.96	0	0	0.04	0	0	0.32	0	0	92.80	0	0	DL	100.12	930
GEQ142	0	DL	0	4.61	DL	0	0	0	DL	0.27	0	0	95.29	0	DL	DL	100.17	954
GEQ143	DL	DL	0	7.03	0	0	0	0	0	0.33	DL	0.02	93.56	0	0	0	100.95	930
GEQ144	0	0	0	7.24	0	0	DL	0	0	0.68	0.03	0	91.87	0	DL	0	99.82	927
GEQ145	0	DL	0	10.90	0	0	DL	0	0	0.90	DL	0	87.78	0	0	0	99.58	890
GEQ146	0.04	0	DL	3.22	DL	0	0.02	0.02	0.49	0.41	0	0	95.97	0	0	0	100.18	967
GEQ147	DL	0	0	7.33	0	0	0.05	0	0.34	0.43	0	0	91.87	0	0	DL	100.01	926
GEQ148	DL	DL	0	4.50	DL	0	0	0	0	0.52	0	0	94.84	0	0	0	99.85	955
GEQ149	0	0	0	6.53	DL	0	DL	DL	DL	0.32	DL	0	92.30	0	0.04	DL	99.18	934
GEQ150	0	DL	0	5.27	0	0	0	0	0.39	0.46	0	0	94.15	0	0	DL	100.27	947
GEQ151	DL	0	0	0.12	0	0	0	0	DL	0.53	DL	0	99.90	0	DL	0	100.55	999
GEQ152	DL	0	0	1.52	DL	0	0	0	DL	0.43	0	0	98.38	0	0	0	100.33	985
GEQ153	0	DL	DL	4.54	0	0	0	0	DL	0.36	0	0	95.03	0	0	DL	99.93	954
GEQ154	0	0	0.02	36.17	0	0	0.04	0	0.20	0.30	0	0	62.48	0	DL	0	99.22	633
GEQ155	DL	DL	0.03	3.52	0	0	0.03	0	0.17	0.38	0.06	0	96.72	0	0	0.05	100.96	965
GEQ156	0	DL	0	0.05	0	0	0	0	0.49	0.33	0	0	98.35	0	DL	DL	99.22	999

http://www.kcdz.ac.cn/

续表　2-3

Continued Table　2-3

样品号	As	Se	Ge	Ag	Sb	Pb	Te	S	Hg	Bi	Ni	Zn	Au	Cu	Fe	Co	总和	成色
GEQ157	DL	0	0.05	10.88	0	0	0.06	0	0.35	0.47	0	0	88.58	0	DL	0	100.39	891
GEQ158	0	0	0	4.88	DL	0	0.03	0	0.28	0.34	0	0	94.63	0	0	0	100.16	951
GEQ159	0	0	0.03	13.86	0	0	0	0	0.23	0.31	0	0	85.10	0	0	DL	99.52	860
GEQ160	0	DL	0	10.13	0	0	DL	0	0.24	0.22	0	0	89.07	0	DL	0	99.67	898
GEQ161	DL	0.04	0	6.77	0	0	0	0	0.30	0.21	0	0	92.74	DL	0	0	100.06	932
GEQ162	DL	0	0	7.47	0	0	DL	0.02	0.34	0.27	DL	0	92.22	0	0	0.02	100.34	925
GEQ163	0.05	0	0	5.20	0	0	0.02	0	0.45	0.56	0	0	93.72	0	0	DL	100.00	947
GEQ164	DL	0	0.03	4.40	0	0	0	0	0.46	0.23	0	0	95.77	0.04	0	0	100.92	956
GEQ165	DL	0	0	9.86	DL	0	0	0	0.17	0.23	DL	0	89.31	DL	0	0	99.57	901
GEQ166	0	DL	0	4.90	0	0	0	0	DL	0.24	0	0	95.53	0	0	DL	100.67	951
GEQ167	0	0	0	9.19	0	0	DL	0	0.55	0.16	DL	0	90.44	0	DL	DL	100.33	908
GEQ168	0	0	0	8.91	0	0	0	0	0.34	0.31	0	0	90.68	0	DL	0	100.24	911
GEQ169	DL	0	0	40.21	0	0	0.06	0	1.83	0.07	0	0	57.33	0	0	DL	99.49	588
GEQ170	DL	0	0	1.92	0	0	0.04	0	0.20	0.20	0	0	98.33	0	0.02	DL	100.71	981
GEQ171	0	DL	0.04	10.33	DL	0	DL	0	DL	0.26	0	0.05	88.92	0	0	DL	99.60	896
GEQ172	0	DL	0	2.49	0	0	0	0	DL	0.29	0	0	97.73	0	0	0	100.51	975
GEQ173	0	0	0	11.95	0	0	0.07	0	0.22	0.33	0	0	87.45	0	0	DL	100.03	880
GEQ174	0	DL	0	6.17	0	0	0	DL	0	0.28	DL	0	70.06	0	DL	0.02	76.53	919
GEQ175	0	DL	0.03	6.07	0	0	0.03	DL	0	0.13	0	0	67.42	0	0	0	73.68	917
GEQ176	0	DL	0	4.91	0	0	0	0	0	0.16	0	0	68.95	0	0.02	0	74.04	934
GEQ177	0	DL	DL	4.12	DL	0	0	0	0	0.23	DL	0	65.51	DL	0	0	69.88	941
GEQ178	0	0	0	5.78	DL	0	0	0	0	0.74	0	0	96.46	0	0	0	102.98	943
GEQ179	0	0	DL	0.27	0	0	0	0	DL	0.63	DL	0	99.75	0	0	0	100.66	997
GEQ180	0	DL	0	7.16	0.03	0	0.03	0	DL	0.41	0	0	93.54	DL	0	0	101.16	929
GEQ181	DL	DL	0	4.50	0	0	0.03	0	DL	0.64	DL	0	96.25	0	DL	0	101.43	955
GEQ182	DL	DL	0	8.02	0	0	0.08	0	0	0.40	0	0	92.26	0	0	0	100.76	920
GEQ183	0	0	0	9.49	DL	0	0	0	DL	0.55	0	0	88.64	0	0	0	98.68	903
GEQ184	0	0	0	0.13	0	0	0.09	0	DL	0.60	0	0	99.11	DL	DL	DL	99.93	999
GEQ185	DL	0	0	10.16	0	0	DL	DL	0.17	0.48	0	0	90.17	0	DL	0	100.98	899
GEQ186	0	0	0.03	8.10	0	0	DL	0	DL	0.67	DL	0	92.57	0	0	0	101.36	920
GEQ187	0	0	DL	10.23	0	0	0	0	0	0.61	DL	0	89.98	0	0	0	100.82	898
GEQ188	0	DL	0	6.10	0	0	0	0	0	0.64	0	0	93.75	0	0	DL	100.49	939
GEQ189	0	0	0.02	3.84	0	0	0	0	DL	0.46	0	0	96.48	0	0	0.03	100.83	962

注："DL"表示含量低于检测限。

http://www.kcdz.ac.cn/

后的搬运过程中基本保持稳定(Knight et al., 1999a)。考虑到Klondike地区与本研究区相似，砂金均为流水搬运、沉积形成(Knight et al., 1999a)，本研究采用了上述Knight等(1999a)建立的模型。本次Shilo-距离模型投图(图7)结果显示，尕尔勤矿区砂金的整体搬运距离在3.0 km以内。尕尔勤矿区砂金以中等圆状颗粒为主(59.8%)，而圆状颗粒占比相对较小(34.2%)，甚至可见部分角状颗粒(占比6.0%)，反映尕尔勤矿区砂金的磨圆度整体仍不稳定，仍有较大的增加空间，这与上述投图结果相一致，均表明尕尔勤矿区砂金离物源区的距离较近。

Townley等(2003)对比了来自智利、玻利维亚、西非以及加拿大不同沉积环境下的砂金形貌与搬运距离的关系。研究发现，随着搬运距离的增加，颗粒折叠开始频繁出现，颗粒表面由于撞击坑洞、擦痕的增多将变得粗糙且光泽暗淡，表面的一些共生矿物(如石英、铁氧化物)及其矿物印模变得越来越少。对尕尔勤矿区的砂金观察统计发现，砂金表面撞击

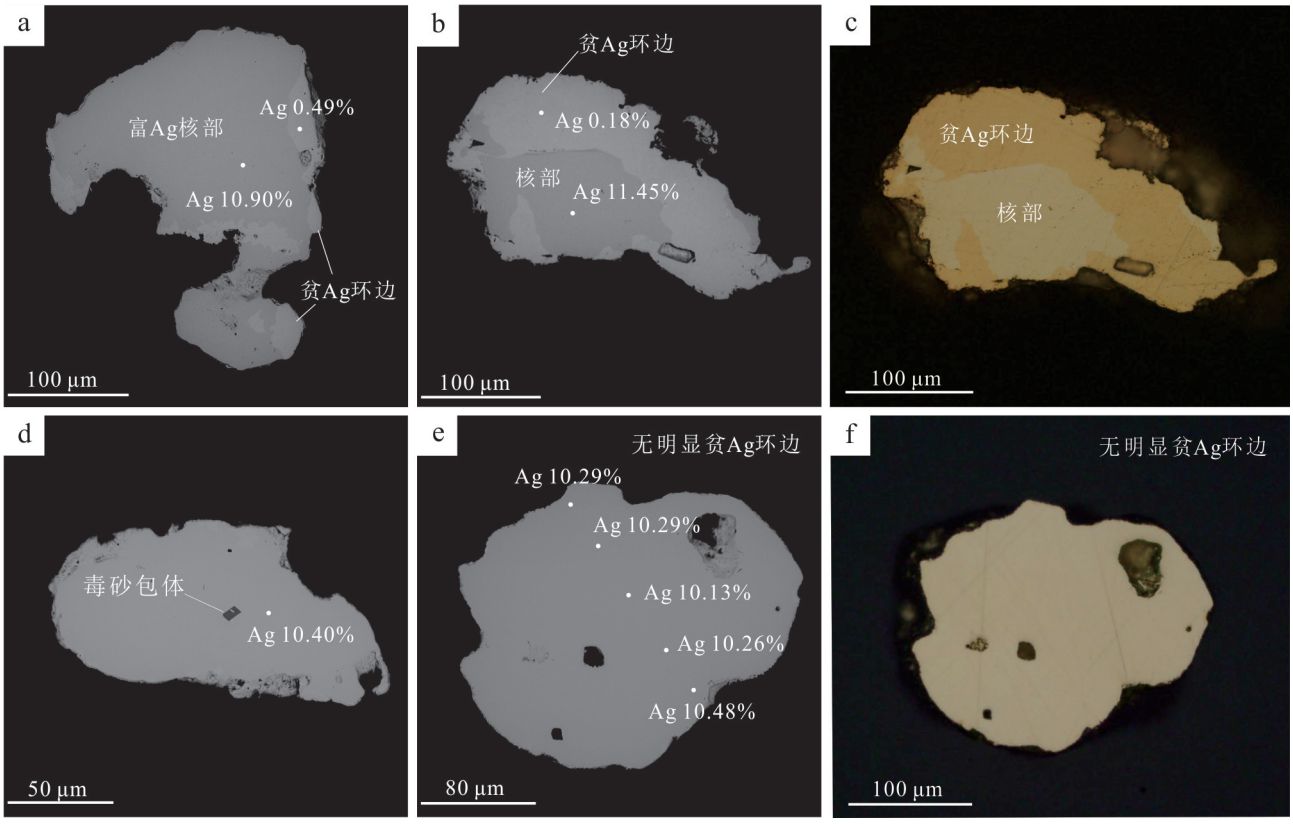

图6 尕尔勤矿区砂金内部成分结构特征

a、b. 具有明显富金环边的砂金(BSE);c. 图6b对应的光学显微镜照片;d. 环边不发育且含矿物包体的砂金(BSE);e. 环边不发育的均质砂金(BSE);f. 图6e对应的光学显微镜照片

Fig. 6 Internal textural and composition features of placer gold grains from the Gaerqin

a, b. Gold particle with obvious depleted-Ag rim(BSE); c. The corresponding optical image of figure 6b; d. Gold particle with inclusions but gold-rich rim undeveloped(BSE); e. Homogeneous gold particle with no gold-rich rim(BSE); f. The corresponding optical image of figure 6e

坑洞和擦痕普遍,说明大部分砂金都经历了搬运过程,但砂金表面矿物印模较发育、部分颗粒仍保留有原始晶面、颗粒折叠或脆裂现象罕见,这与经历了长距离运输的砂金颗粒具有显著区别(dos Santos Alves et al., 2020; Ali et al., 2021),而与短距离搬运的砂金特征相吻合(Townley et al., 2003)。值得一提的是,砂金富金环边的厚度在一定程度上与砂金的搬运距离成正相关(Knight et al., 1999a)。整体分析来看,研究区内砂金的富金环边并不发育,厚度很薄或几乎不发育(图6),这进一步反映尕尔勤矿区的砂金为近源成因。

此外需要考虑的是,由于古地理的变化,砂金可能会经历多循环的搬运与沉积(下文称古砂金)。但古砂金在形貌上应与长距离搬运的砂金相一致,即通常具有较大的扁平度和圆度值,形状多呈扁圆片状,颗粒边缘折叠明显(例如Youngson et al.,1999; dos Santos Alves et al., 2020)。显然,本研究中的砂金颗粒与古砂金形貌特征不符。

综合上述讨论可知,尕尔勤矿区的砂金具有明显的近源堆积的特点,搬运距离十分有限,离物源区较近。结合砂金物质来源讨论结果以及尕尔勤矿区残坡积物中砂金产出丰富的地质事实,可以认为,尕尔勤矿区的砂金是该矿区产出的金(化)矿体剥蚀的产物。

4.3 成矿类型判断及意义

自然金中常含有Ag、Cu、Hg等杂质元素及各种微细矿物包体(Leak et al., 1998; Chapman et al., 2000a; 2000b)。不同金成矿环境下形成的自然金在元素组成、含量及矿物包体组合上常具有明显的差异(Chapman et al., 2018; 2022)。因此,研究砂金微区元素及矿物包体组成特征能够用来指示剥蚀源区的金矿化类型(Chapman et al., 2006; 2017;

http://www.kcdz.ac.cn/

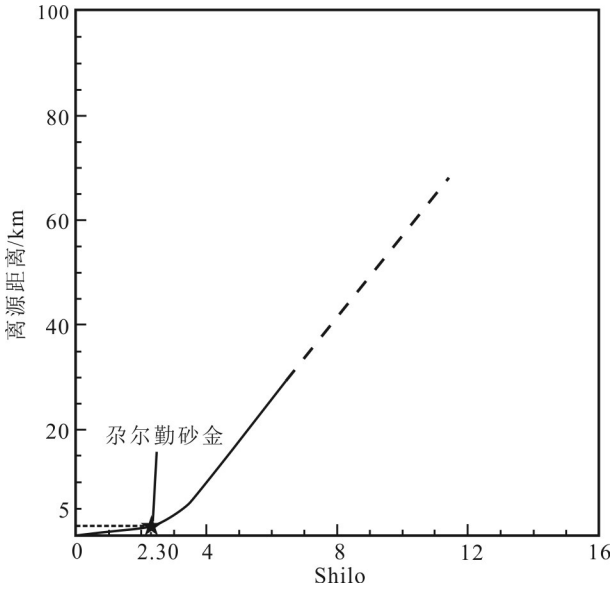

图 7　尕尔勤矿区砂金 Shilo 指数与离源距离关系（底图据 Knight et al., 1999a 修改）

Fig. 7　Transport distance-Shilo index relation for placer gold grains from the Gaerqin (base map from Knight et al., 1999a)

2018; 2022）。

在利用砂金的微区地球化学特征探讨尕尔勤矿区金矿化类型之前，有必要确定金颗粒在剥离到地表之后是否仍保留继承有深部的原生矿化信息。一方面，前人研究表明，由于银的活化去除（Desborough, 1970）或金的溶解再沉淀过程（Groen et al., 1990），在搬运过程中，砂金的成分组成会发生不同程度的改变，证据是砂金富金环边结构的存在。然而，大量研究结果已证实，即使砂金的环边结构普遍存在，其对砂金核部的影响也十分有限，砂金核部成分仍能够代表剥蚀源区的原生矿化信息（Giusti et al., 1984; Herail et al., 1990; Knight et al., 1999b; Chapman et al., 2000a; 2000b）。本次对砂金进行微区地球化学分析之前，用高分辨率光学显微镜及扫描电镜电子背散射图像对砂金的内部成分结构进行了细致的区分，用于后续矿化类型判别的元素组成全部来自于砂金核部。因而，就本研究而言，砂金元素组成特征是深部矿化信息的反映。

另一方面，Loen（1995）研究发现，当砂金的搬运距离达到 10~20 km，砂金内部大多数原生矿物包体将发生丢失。Chapman 等（2000a）也提到这样一种可能：随着搬运距离的增加，砂金选择性地去除一些不稳定的原生矿物包体，而机械地嵌入一些河道中的矿物。上述 2 种过程无疑将极大地影响砂金矿物包体的指示结果。然而，这 2 种情况在本研究中发生的可能性均很小：首先，上文已证明，研究区内的砂金搬运距离较短，远小于 10 km，这显然与 Loen（1995）所提到的情况不符。其次，砂金中观察到的矿物包体大多为磁黄铁矿、方铅矿、毒砂、铅铋硫化物等在地表环境下极不稳定的微细矿物包体（图 8，图 9），这些包体不可能由河道中同类矿物机械“嵌入”形成；假设机械嵌入情况普遍存在，那么石英、金红石、锆石等稳定矿物将以矿物包体的形式大量嵌入到砂金内部，然而，这种情况显然没有发生在所研究的砂金样本中（图 6，图 8）。另外，不透明矿物包体和砂金之间的界线规则且平滑（图 8），也进一步表明机械嵌入形成不透明矿物包体的情况其发生的可能性很小。由上述讨论可知，尕尔勤矿区砂金核部元素以及内部不透明矿物包体组成特征，都继承保留了剥蚀源区自然金颗粒的原生矿化信息。因此，两者均可以对砂金剥蚀源区金矿化类型进行有理的推测。

自然金的成色与金沉淀的物理化学环境密切相关（Morrison et al., 1991; 刘英俊等, 1991）。斑岩-浅成低温热液环境下成矿机制通常较为复杂，成矿流体的冷却、沸腾以及混合作用对金的沉淀都具有重要的控制作用（Morrison et al., 1991; Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2010）。因而，在斑岩、浅成低温热液环境中形成的自然金，其 Ag 含量变化较大，对应的金成色变化范围也较大。其中，浅成低温热液金成色范围最大，为 0~1000，斑岩环境下金成色范围介于 650~1000（Morrison et al., 1991）。相反，在造山型金矿形成过程中，硫化作用是控制金沉淀的主要过程（Morrison et al., 1991; Goldfarb et al., 2019），总体上成矿机制较为单一，因此造山型金矿金成色范围有明显减小，一般在 780~1000 变化（Morrison et al., 1991; Liu et al., 2021）。本文研究结果显示，砂金三维及形状参数在直方图（图 5）中均呈现明显的单峰特征，说明尕尔勤矿区的砂金来自同一剥蚀源区（dos Santos Alves et al., 2020），砂金中普遍含有较高的 Bi 和极低的 Cu 也支持尕尔勤矿区砂金为同一成矿体系剥蚀的产物。尕尔勤矿区的砂金，Ag 变化范围较大（0.05%~40.21%），相应的金成色范围较大（588~999），暗示着尕尔勤矿区金成矿环境较为复杂，整体与斑岩-浅成低温热液环境下形成的金颗粒特征较为相符（Morrison et al., 1991）。

http://www.kcdz.ac.cn/

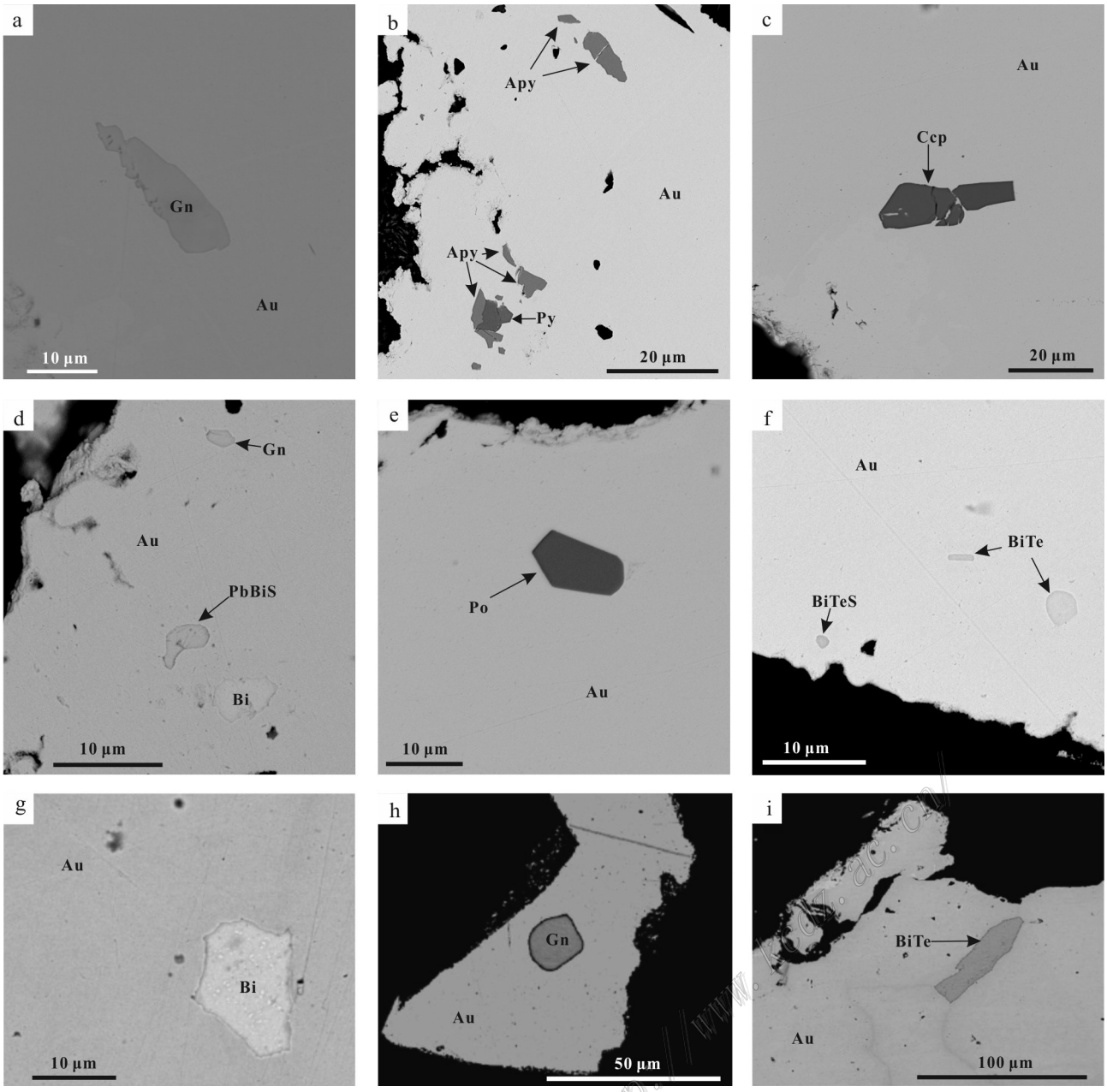

图8 尕尔勤矿区和加拿大育空地区砂金典型矿物包体BSE图

a~f. 尕尔勤砂金内典型不透明矿物包体; g~i. 加拿大育空地区钙碱性斑岩-浅成低温热液金成矿系统中砂金典型不透明矿物包体(据Chapman et al., 2018)

Gn—方铅矿;Apy—毒砂;Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;PbBiS—铅铋硫化物;Bi—自然铋;Po—磁黄铁矿;BiTe—铋碲化物; BiTeS—铋碲硫化物;Au—金颗粒

Fig. 8 BSE images of example mineral inclusions in gold grains from the Gaerqin ore area and Yukon territory, Canada

a~f. Examples of opaque mineral inclusions in Gaerqin placer gold grains; g~i. Examples of opaque mineral inclusions in calc-alkaline porphyry-epithermal gold system placer gold grains in Yukon Territory, Canada (after Chapman et al., 2018)

Gn—Galena; Apy—Arsenopyrite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; PbBiS—Undifferentiated Pb-Bi sulfides; Bi—Native bismuth; Po—Pyrrhotite; BiTe—Undifferentiated Bi-tellurides; BiTeS—Undifferentiated Bi-Te sulfides; Au—Gold grain

相比砂金的核部元素组成,不同金成矿类型来源的金颗粒中不透明矿物包体组合之间的差异更为直接且稳定,是判别砂金来源最有力的依据(Chapman et al., 2000a)。综合砂金核部元素及内部不透

明矿物包体组成特征，可以对砂金剥蚀源区的金矿化类型进行更为准确地推断（Chapman et al., 2006; 2009; 2017; 2018）。

Chapman等（2018）统计研究了加拿大育空地区钙碱性斑岩-浅成低温热液环境下1459颗金颗粒，并与造山型金成矿系统来源的金颗粒进行了对比，发现造山型金矿来源的金颗粒中不透明矿物包体组合通常较单一，主要为简单的硫化物（例如黄铁矿和方铅矿）和硫砷化物（例如毒砂），除个别碲银矿外，其他复杂的碲化物或硫盐类矿物则非常少见（图9）。相比之下，钙碱性斑岩-浅成低温热液金成矿系统来源的金颗粒中不透明矿物包体种属要复杂得多，除简单硫化物或硫砷化物外，常富有Bi-Pb-Te-S系列硫盐类和硫化物类矿物包体（图9）。本次研究发现，尕尔勤矿区的砂金中含有复杂的矿物包体组合（图8, 图9），除黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、毒砂等简单硫化物（或硫砷化物）外，自然铋、铅铋硫化物、碲铋硫化物等矿物包体也十分常见，这与造山型金矿来源的砂金特征明显不同，而与钙碱性斑岩-浅成低温热液金矿系统来源砂金特征相符合（图9）（Chapman et al., 2018; 2022）。

已有大量研究资料表明，尕尔勤矿区与多龙矿集区内如波龙、多不杂、拿若、拿顿、铁格隆南等斑岩-浅成低温热液铜（金银）矿区内的成矿作用为同一岩浆源区演化的产物，相关证据主要表现在：尕尔勤矿区成矿岩体与多龙矿集区其他矿区内成矿岩体在岩性、成岩年龄、岩石地球化学特征等方面基本一致，岩性均为中酸性的高钾-钙碱性或钾玄岩系的闪长玢岩-花岗闪长斑岩-花岗斑岩岩石系列、成岩年龄集中在120 Ma左右、岩石均具有明显的轻稀土元素和大离子亲石元素富集、重稀土元素和高场强元素亏损、Hf同位素均大于0等特点（陈华安等，2013; 祝向平等，2015; Li et al., 2016; 王松等，2017; 张志等，2017; 林彬等2019; 李玉彬等，2019），反映尕尔勤矿区内的成矿岩体与多龙矿集区其他矿区成矿岩体具有相同的岩浆源区和岩石成因。因而，笔者根据砂金矿物化学特征推测尕尔勤矿区的砂金来自于斑岩-浅成低温热

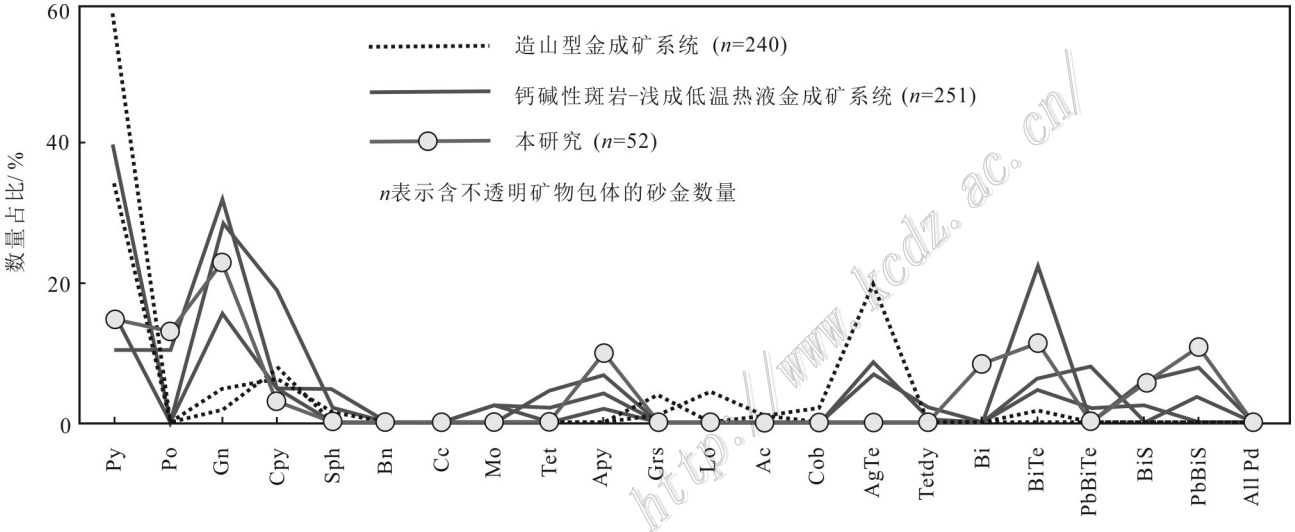

图 9　造山型和钙碱性斑岩-浅成低温热液型金成矿系统砂金不透明矿物包体组成对比

（底图据Chapman et al., 2018）

Py—黄铁矿；Po—磁黄铁矿；Gn—方铅矿；Cpy—黄铜矿；Sph—闪锌矿；Bn—斑铜矿；Cc—辉铜矿；Mo—辉钼矿；Tet—黝铜矿；Apy—毒砂；Grs—辉砷镍矿；Lo—斜方砷铁矿；Ac—辉银矿；Cob—辉钴矿；AgTe—含Ag、Te的矿物，如碲银矿、硫碲银矿、碲金银矿；Tetdy—辉碲铋矿；Bi—自然铋；BiTe—铋碲化物；PbBiTe—铅铋碲化物；BiS—辉铋矿；PbBiS—铅铋硫化物；All Pd—含钯矿物

Fig. 9　Comparison of opaque mineral inclusion signatures of placer gold grains between orogenic gold and calc-alkalic porphyry-epithermal gold systems (base map from Chapman et al., 2018)

Py—Pyrite; Po—Pyrrhotite; Gn—Galena; Cpy—Chalcopyrite; Sph—Sphalerite; Bn—Bornite; Cc—Chalcocite; Mo—Molybdenite; Tet—Tetrahedrite ($(Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}$); Apy—Arsenopyrite; Grs—Gersdorffite; Lo—Lollingite; Ac—Acanthite; Cob—Cobaltite; AgTe—Sum of Ag-Te bearing minerals: such as hessite, cervelleite, petzite; Tetdy—Tetradymite; Bi—Native bismuth; BiTe—Undifferentiated Bi-tellurides; PbBiTe—Undifferen-tiated Pb-Bi tellurides; BiS—Bismuthinite; PbBiS—Undifferentiated Pb-Bi sulfides; All Pd—All Pd-bearing minerals

http://www.kcdz.ac.cn/

液成矿系统也与整个矿集区的成矿地质背景相吻合。

富金斑岩(铜)环境下形成的金通常具有明显的Cu异常,据此可以与浅成低温热液型金矿来源的金相区别(Morrison et al., 1991; Townley et al., 2003)。本次对尕尔勤矿区189颗砂金核部组成研究发现,砂金中的Cu含量和含铜矿物包体检出率都非常低,在所有测试砂金颗粒中仅有2颗砂金Cu含量高于检测限值,52颗含矿物包体的砂金中仅有2颗发现有含铜矿物包体,因而,富金斑岩铜矿体并非尕尔勤矿区砂金的主要来源。其次,尽管斑岩型金矿与浅成低温热液金矿来源的金颗粒在微量元素上可能具有一定相似性(Townley et al., 2003),但富金的斑岩矿床,Au的平均品位一般在0.4 g/t以上,有关的成矿岩体一般富含热液磁铁矿(Sillitoe et al., 2000),而已有勘查资料表明,尕尔勤矿区已揭露的部分斑岩铜(金)矿体平均Au品位约0.15 g/t,而且热液磁铁矿并不十分发育,此外,多龙矿集区内迄今为止并没有发现斑岩型金矿床类型。因此,笔者倾向尕尔勤矿区的砂金更可能主要来自于浅成低温热液金矿(化)体的剥蚀。尕尔勤砂金核部显示较高的Hg、Te,由于这2种元素都是典型的低温热液元素(Varekamp et al., 1984; 刘恒福等,2017),故可能也与金沉淀温度相对较低有关(Knight et al., 1999b),但这需要进一步的工作来验证。

值得一提的是,由于矿床是地质作用形成的,所含有的矿物资源的质和量在现有经济技术条件下能被开采利用的综合地质体。那么,尕尔勤矿区浅成低温热液金矿体形成后其体量和品位是否达到了一个矿床的标准呢?首先,尕尔勤矿区下游不远处发育的恰秋沟砂金矿,初步探求的砂金资源量已经超过2 t,属中型规模的砂金矿,暗示着尕尔勤矿区内的金矿(化)体可能达到一定规模。其次,尕尔勤矿区残坡积物中砂金含量十分丰富,本次12个采样点普遍检出了砂金,检出率达到了6.2颗/kg,说明尕尔勤矿区内载金地质体可能仍在接受剥蚀,且遭受剥蚀的金矿(化)体品位较高。再者,尕尔勤矿区的砂金颗粒平均大小达到了180 μm,以中粗粒金为主,同样暗示着矿区内的金矿(化)体金品位较高。这些迹象说明尕尔勤矿区内已遭受剥蚀的浅成低温热液金矿(化)体所含的金资源的质和量可能达到了矿床标准。

综上所述,尕尔勤矿区内广泛分布的砂金是该矿区产出的浅成低温热液金矿体剥蚀的产物,结合矿区东侧出露的富金多孔状硅帽、多龙矿集区斑岩-浅成低温热液型铜金成矿地质背景、尕尔勤矿区外围恰秋沟砂金矿的体量、矿区残坡积物中砂金的丰度以及砂金平均大小,本文认为尕尔勤矿区可能存在一个遭受过剥蚀的浅成低温热液金矿床。本研究为班公湖-怒江成矿带多龙矿集区乃至砂金分布广泛的西藏地区寻找浅成低温热液型金矿床提供了进一步的证据。

5 结 论

(1) 对尕尔勤矿区成矿以来的沉积物、砂金形貌和微区地球化学特征综合分析,显示尕尔勤矿区内的砂金既不是冰川远源搬运的产物,也不具明显的生物化学或化学成因特征,是金矿(化)体剥蚀的产物。

(2) 砂金形貌学及内部成分结构研究发现,尕尔勤矿区的砂金整体具有低扁平度、高球度、中等磨圆度特征,砂金富金环边不发育、厚度普遍较薄,表明尕尔勤矿区的砂金离剥蚀源区较近,而且不是经历多循环搬运、沉积的古砂金,而是尕尔勤矿区产出的金矿(化)体剥蚀的产物。

(3) 砂金形貌学和微区地球化学特征显示,尕尔勤矿区的砂金为同一成矿体系剥蚀的产物。砂金Ag变化大、金成色范围大,富Bi-Pb-Te-S系列矿物包体,极低的Cu、较高的Hg、Te等特征以及多龙矿集区斑岩-浅成低温热液铜金成矿地质背景、尕尔勤矿区地表出露的富金多孔状硅帽表明,尕尔勤矿区的砂金来源于浅成低温热液金矿(化)体的剥蚀。综合尕尔勤矿区中砂金产出体量及颗粒大小,认为尕尔勤矿区可能存在一个遭受过剥蚀的浅成低温热液型金矿床。

致 谢 中铝西藏金龙矿业股份有限公司为笔者提供了野外支持,中国地质科学院矿产资源研究所的郭唯明工程师、陈振宇研究员在砂金微区分析和解释方面提供了帮助,中国地质科学院矿产资源研究所的唐菊兴研究员、刘治博副研究员和成都理工大学的王勤老师对论文初稿的形成提出了许多宝贵的意见,匿名审稿专家悉心审稿,提出了诸多对文章具有建设性的建议和意见,在此一并表示感谢!

http://www.kcdz.ac.cn/

References

Alam M, Li S R, Santosh M and Yuan M W. 2019. Morphology and chemistry of placer gold in the Bagrote and Dainter streams, northern Pakistan: Implications for provenance and exploration[J]. Geological Journal, 54(3): 1672-1687.

Ali L, Chapman R, Farhan M, Shah M T, Khattak S A and Ali A. 2021. Exploration methodology using morphology and alloy composition of alluvial gold: A case study from quaternary deposits of the Nowshera district, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 38(1): 367-377.

Barrios S, Merinero R, Lozano R and Orea I. 2015. Morphogenesis and grain size variation of alluvial gold recovered in auriferous sediments of the Tormes Basin (Iberian Peninsula) using a simple correspondence analysis[J]. Mineralogy and Petrology, 109(6): 679-691.

Bowell R J. 1992. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: Implications for the supergene behaviour of gold[J]. Mineralogical Magazine, 56(385): 545-560.

Butt C R, Hough R M and Verrall M. 2020. Gold nuggets: The inside story[J]. Ore and Energy Resource Geology, 4: 100009.

Cabral A R, König S, Eickmann B, Brauns M, Tupinambá M, Lehmann B and Varas-Reus M I. 2021. Extreme fractionation of selenium isotopes and possible deep biospheric origin of platinum nuggets from Minas Gerais, Brazil[J]. Geology, 49(11): 1327-1331.

Cailleux A and Tricart J. 1959. Initiation à l'étude des sables et des galets[M]. Paris: Centre de documentation Universitaire.

Chapman R J, Leake RC, Moles N R, Earls G, Cooper C, Harrington K and Berzins R. 2000a. The application of microchemical analysis of alluvial gold grains to the understanding of complex local and regional gold mineralization: A case study in the Irish and Scottish Caledonides[J]. Econ. Geol., 95(8): 1753-1773.

Chapman R J, Leake R C and Moles N R. 2000b. The use of microchemical analysis of alluvial gold grains in mineral exploration: Experiences in Britain and Ireland[J]. Journal of Geochemical Exploration, 71(3): 241-268.

Chapman R J and Mortensen J K. 2006. Application of microchemical characterization of placer gold grains to exploration for epithermal gold mineralization in regions of poor exposure[J]. Journal of Geochemical Exploration, 91(1-3): 1-26.

Chapman R J, Leake R C, Bond D P G, Stedra V and Fairgrieve B. 2009. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance[J]. Econ. Geol., 104(4): 563-585.

Chapman R J, Mortensen J K, Crawford E C and LeBarge W. 2010a. Microchemical studies of placer and lode gold in the Klondike district, Yukon, Canada: 1. evidence for a small, gold-rich, orogenic hydrothermal system in the Bonanza and Eldorado Creek area[J]. Econ. Geol., 105(8): 1369-1392.

Chapman R J, Mortensen J K, Crawford E C and LeBarge W. 2010b. Microchemical studies of placer and lode gold in the Klondike district, Yukon, Canada: 2. constraints on the nature and location of regional lode sources[J]. Econ. Geol., 105(8): 1393-1410.

Chapman R J, Mileham T, Allan M M and Mortensen J K. 2017. A distinctive Pd-Hg signature in detrital gold derived from alkalic Cu-Au porphyry systems[J]. Ore Geology Reviews, 83: 84-102.

Chapman R J, Allen M M, Mortensen J K, Wrighton T M and Grimshaw M R. 2018. A new indicator mineral methodology based on a generic Bi-Pb-Te-S mineral inclusion signature in detrital gold from porphyry and epithermal environments in Yukon Territory, Canada[J]. Mineralium Deposita, 53(6): 815-834.

Chapman R J, Mortensen J K, Allan M M, Walshaw R D, Bond J and MacWilliam K. 2022. A new approach to characterizing deposit type using mineral inclusion assemblages in gold particles[J]. Econ. Geol., 117(2): 361-381.

Chen H A, Zhu X P, Ma D F, Huang H X, Li G M, Li Y B, Li Y C, Wei L J and Liu C Q. 2013. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet and its mineralizing significance[J]. Acta Geologica Sinica, 87(10): 1593-1611(in Chinese with English abstract).

Desborough G A. 1970. Silver depletion indicated by microanalysis of gold from placer occurrences, western United States[J]. Econ. Geol., 65(3): 304-311.

dos Santos Alves K, Sánchez S B, Barreiro J G, Palomares R M and Prieto J M. 2020. Morphological and compositional analysis of alluvial gold: The Fresnedoso gold placer (Spain)[J]. Ore Geology Reviews, 121: 103489.

Feng X L and Du G S. 1999. The distribution, mineralization types and prospecting and exploration of the gold deposits in Xizang[J]. Tethyan Geology, 23: 31-38 (in Chinese with English abstract).

Fang X, Tang J X, Ding S, Wang Q, Yang C and Tang P. 2013. Geochemical characteristics of rocks and tectonic environment in Gaerqin Cu-Au deposit, Duolong district, Tibet[J]. Acta Mineralogica Sinica, 33(Supp.): 306-307(in Chinese).

Fang X, Ding S, Wang Y Y, Wang Q, Song Y, Yang C and Zhang Z. 2014. The prediction of metallogenic potential in Gaerqin Cu-Au deposit, Duolong district, Tibet[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.): 1005-1006(in Chinese).

Fang X, Tang J X, Song Y, Yang C, Ding S, Wang Y Y and Tang P. 2015. Formation epoch of the South Tiegelong supelarge epithermal Cu(Au-Ag) deposit in Tibet and its geological implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2: 168-176(in Chinese with English abstract).

Freyssinet P, Butt C R M, Morris R C and Piantone P. 2005. Ore-for-

http://www.kcdz.ac.cn/

ming processes related to lateritic weathering[J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 681-722.

Geng Q R, Pan G T, Wang L Q, Peng Z M and Zhang Z. 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang Belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1261-1274(in Chinese with English abstract).

Geng Q R, Zhang Z, Peng Z M, Guan J L, Zhu X P and Mao X C. 2016. Jurassic—Cretaceous granitoids and related tectono-metallogenesis in the Zapug-Duobuza arc, western Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 77: 163-175.

Giusti L and Smith D G. 1984. An electron microprobe study of some Alberta placer gold[J]. Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 33(3): 187-202.

Goldfarb R, Qiu K F, Deng J, Chen Y J and Yang L Q. 2019. Orogenic gold deposits of China[J]. SEG special Publications, 22: 263-324

Groen J C, Craig J R and Rimstidt J D. 1990. Gold-rich rim formation on electrum grains in placers[J]. The Canadian Mineralogist, 28 (2): 207-228.

Hedenquist J W, Arribas A and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 245-277.

Hérail G, Fornari M, Viscarra G and Miranda V. 1990. Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of a polygenic fluviatile placer: the MioPleistocene Tipuani placer example (Andes, Bolivia)[J]. Chronique de la Recherche Minière, 500: 41-49.

Hough, R M, Butt C R and Fischer-Bühner J. 2009. The crystallography, metallography and composition of gold[J]. Elements, 5(5): 297-302.

Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 1977. Manual of placer mineral identification[M]. Beijing: Geological Publishing House. 241p (in Chinese).

Ketchaya Y B, Dong G, Santosh M and Lemdjou Y B. 2022. Microchemical signatures of placer gold grains from the Gamba district, northern Cameroon: Implications for possible bedrock sources[J]. Ore Geology Reviews, 141: 104640.

Knight J B, Morison S R and Mortensen J K. 1999a. The relationship between placer gold particle shape, rimming, and distance of fluvial transport as exemplified by gold from the Klondike district, Yukon Territory, Canada[J]. Econ. Geol., 94 (5): 635-648.

Knight J B, Morison S R and Mortensen J K. 1999b. Lode and placer gold composition in the Klondike District, Yukon Territory, Canada: Implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits[J]. Econ. Geol., 94 (5): 649-664.

Krumbein W C. 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. Journal of Sedimentary Research, 11(2): 64-72.

Lalomov A V, Chefranov R M, Naumov V A, Naumova O B, LeBarge W and Dilly R A. 2017. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits[J]. Ore Geology Reviews, 85: 321-335.

Leake R C, Chapman R J, Bland D J, Stone P, Cameron D G and Styles MT. 1998. The origin of alluvial gold in the Leadhills areas of Scotland: Evidence from interpretation of internal characteristics[J]. Journal of Geochemical Exploration, 63: 7-36.

Li G M, Zhang L K, Zhang Z, Xia X B, Liang W and Hou C Q. 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41(2): 351-360(in Chinese with English abstract).

Li J X, Qin K Z, Li G M, Xiao B, Zhao J X and Chen L. 2016. Petrogenesis of cretaceous igneous rocks from the duolong porphyry Cu-Au deposit, central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotope characteristics[J]. Geological Journal, 51: 285-307.

Li Y B, Zhong W T, Guo J C, Qin Z P, Zhang Z, Li J L, Deng S Q and Li Y C. 2019. Petrogenesis of igneous rocks and ore forming material source of the Nating porphyry Cu(Au) deposit in the western section of the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(6): 1717-1737(in Chinese with English abstract).

Li Y C, Huang H X, Liu H, Lu M H and Lan S S. 2017. Gold mineralization in the Bangong lake-Nujiang metallogenic zone, Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(2): 1-13(in Chinese with English abstract).

Lin B, Fang X, Wang Y Y, Yang H H and He W. 2019. Petrologic genesis of ore-bearing porphyries in Tiegelongnan giant Cu(Au, Ag) deposit, Tibet and its implications for the dynamic of Cretaceous mineralization, Duolong[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 642-664(in Chinese with English abstract).

Liu H F, Xu Y F and Li S P. 2017. Grouping of thirty-nine elements and elemental geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House. 129p(in Chinese).

Liu H M and Beaudoin G. 2021. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits[J]. Ore Geology Reviews, 132: 104066.

Liu Y J and Ma D S. 1991. Geochemistry of gold[M]. Beijing: Science Press. 374p (in Chinese).

Loen J S. 1995. Use of placer gold characteristics to locate bedrock gold mineralization[J]. Exploration and Mining Geology, 4(4): 335-339.

McClenaghan M B and Cabri L J. 2011. Review of gold and platinum group element (PGE) indicator minerals methods for surficial sediment sampling[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 11: 265-278.

Moles N R, Chapman R J and Warner R B. 2013. The significance of

http://www.kcdz.ac.cn/

copper concentrations in natural gold alloy for reconnaissance exploration and understanding gold-depositing hydrothermal systems[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 13 (2): 115-130.

Morrison G W, Rose W J and Jaireth S. 1991. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits[J]. Ore Geology Reviews, 6(4): 333-364.

Qin K Z, Li G M, Zhang Q, Li J X, Miao Y, Xiao B, Zhang T P, Duo J, Li J G and Lu Y. 2007. Metallogenic conditions and possible occurrences for epithermal gold mineralizations in Gangdese and Banggonghu belts, Tibet: In view of porphyry-epithermal Cu-Au metallogenetic systematics[A]. Proceedings of the eighth national conference of mineral deposit[C]. Beijing: Geological Publishing House. 666-670(in Chinese).

Qu X M and Xin H B. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry belt in western Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(7): 792-799(in Chinese with English abstract).

Reith F, Fairbrother L, Nolze G, Wilhelmi O, Clode P L, Gregg A, Parsons J E, Wakelin S A, Pring A, Hough R, Southam G and Brugger J. 2010. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation[J]. Geology, 38(9): 843-846.

Reith F, Rea M A, Sawley P, Zammit C M, Nolze G, Reith T, Rantanen K and Bissett A. 2018. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland[J]. Chemical Geology, 483: 511-529.

She H Q, Li J W, Ma D F, Li G M, Zhang D Q, Feng C Y, Qu W J and Pan G T. 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 28: 737-746(in Chinese with English abstract).

Shilo N A and Shumilov Y V. 1970. New experimental data on settling of gold particles in water[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR (Earth Science Section), 195(1): 184-187.

Shuster J and Southam G. 2015. The in-vitro "growth" of gold grains[J]. Geology, 43(1): 79-82.

Sillitoe R H. 2000. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 315-345.

Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Econ. Geol., 105(1): 3-41.

Song Y, Tang J X, Qu X M, Wang D H, Xin H B, Yang C, Lin B and Fan S F. 2014. Progress in the study of mineralization in the Bangongco-Nujiang metallogenic belt and some new recognition[J]. Advances in Earth Science, 29(7): 795-809(in Chinese with English abstract).

Song Y, Yang H H, Lin B, Liu Z B, Wang Q, Gao K, Yang C and Fang X. 2017. The preservation system of epithermal deposits in South Qiangtang terrane of Central Tibetan Plateau and its significance: A case study of the Tiegelongnan superlarge deposit[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(5): 659-669 (in Chinese with English abstract).

Song Y, Yang C, Wei S G, Yang H H, Fang X and Lu H T. 2018. Tectonic control, reconstruction and preservation of the Tiegelongnan porphyry and epithermal overprinting Cu(Au) deposit, Central Tibet, China[J]. Minerals, 8(9): 398.

Song Y, Zeng Q G, Liu H Y, Liu Z B, Li H F and Dexi Y Z. 2019. An innovative perspective for the evolution of Bangong-Nujiang Ocean: Also discussion the Paleo- and Neo-Tethys conversion[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 625-641(in Chinese with English abstract).

Song Y, Li F Q, Zheng M, Sun H and Fang Y. 2021. Research on the source of placer gold in Duolong region, Gize County, northern Tibet[J]. Geological Review, 67(Supp.): 155-156(in Chinese with English abstract).

Sun H, Song Y, Zheng M and Fang Y. 2021. The mineralogical characteristics and significance of placer gold in Gaerqin copper-gold deposit in the Duolong district, Tibet[J]. Geological Review, 67 (Supp.): 179-180(in Chinese with English abstract).

Tang J X, Sun X G, Ding S, Wang Q, Wang Y Y, Yang C, Chen H Q, Li Y B, Li Y B, Wei L J, Zhang Z, Song J, Duan J L, Gao K, Fang X and Tan J Y. 2014a. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 35(1): 6-10 (in Chinese with English abstract).

Tang J X, Wang Q, Yang C, Ding S, Lang X H, Liu H F, Huang Y, Zheng W B, Wang L Q, Gao Y M, Feng J, Duan J L, Song Y, Wang Y Y, Lin B, Fang X, Zhang Z and Yang H H. 2014b. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: Practice of "absence prospecting" deposit metallogenic series[J]. Mineral Deposits, 33(6): 1151-1170(in Chinese with English abstract).

Tang J X, Song Y, Wang Q, Lin B, Yang C, Guo N, Fang X, Yang H H, Wang Y Y, Gao K, Ding S, Zhang Z, Duan J L, Chen H Q, Su D K, Feng J, Liu Z B, Wei S G, He W, Song J L, Li Y B and Wei L J. 2016. Geological characteristics and exploration model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) deposit: The first ten million tons metal resources of a porphyry-epithermal deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(6): 663-690(in Chinese with English abstract).

Tang J X, Wang Q, Yang H H, Gao X, Zhang Z B and Zou B. 2017. Mineralization, exploration and resource potential of porphyry-skarn-epithermal copper polymetallic deposits in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 5: 571-613(in Chinese with English abstract).

Tang J X. 2019. Mineral resources base investigation and research status of the Tibet Plateau and its adjacent major metallogenic belts[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 617-624(in Chinese with English abstract).

Thompson J F H and Newberry R J. 2000. Gold deposits related to re-

http://www.kcdz.ac.cn/

duced granitic intrusions[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 377-400.

Townley B K, Herail G, Maksaev V, Palacios C, De Parseval P, Sepuldeva F, Orellana R, Rivas P and Ulloa C. 2003. Gold grain morphology and composition as an exploration tool application to gold exploration in covered areas[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 3(1): 29-38.

Varekamp J C and Buseck P R. 1984. The speciation of mercury in hydrothermal systems, with applications to ore deposition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(1): 177-185.

Wang Q, Tang J X, Chen Y C, Hou J F and Li Y B. 2019. The metallogenic model and prospecting direction for the Duolong super large copper(gold) district, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (3): 879-896(in Chinese with English abstract).

Wang S, Zhao Y Y, Wang A, Li Y B, Li X S and Guo S. 2017. The study of facieology-mineragraphy, fluid inclusions, and geochemical characteristics and mineralization in Nadun Cu (Au) deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1565-1588(in Chinese with English abstract).

Watterson J R. 1992. Preliminary evidence for the involvement of budding bacteria in the origin of Alaskan placer gold[J]. Geology, 20 (4): 315-318.

Yang C, Tang J X, Beaudoin G, Song Y, Lin B, Wang Q and Fang X. 2020. Geology and geochronology of the Tiegelongnan porphyry-epithermal Cu(Au) deposit, Tibet, China: Formation, exhumation and preservation history[J]. Ore Geology Reviews, 123: 103575.

Youngson J H and Craw D. 1995. Evolution of placer gold deposits during regional uplift, Central Otago, New Zealand[J]. Econ. Geol., 90(4): 731-745.

Youngson J H and Craw D. 1999. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: An example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand[J]. Econ. Geol., 94(5): 615-633.

Zhang Z, Fang X, Tang J X, Wang Q, Yang C, Wang Y Y, Ding S and Yang H H. 2017. Chronology, geochemical characteristics of the Gaerqin porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area in Tibet and discussion about the identification of the lithoscaps and the possible epithermal deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 476-494(in Chinese with English abstract).

Zhu X P, Chen H A, Ma D F, Huang H X, Li G M, Li Y B and Li Y C. 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2159-2164(in Chinese with English abstract).

Zhu X P, Chen H A, Liu H F, Ma D F, Li G M, Huang H X, Zhang H, Liu C Q and Wei L J. 2015. Zircon U-Pb ages, geochemistry of the porphyries from the Duobuza porphyry Cu-Au deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89 (3): 534-548(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈华安, 祝向平, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌, 卫鲁杰, 刘朝强. 2013. 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, 87: 1593-1611.

方向, 唐菊兴, 丁帅, 王勤, 杨超, 唐攀. 2013. 西藏多龙矿集区尕尔勤岩石地球化学特征及构造环境[J]. 矿物学报, 33(增): 306-307.

方向, 丁帅, 王艺云, 王勤, 宋扬, 杨超, 张志. 2014. 西藏多龙矿集区尕尔勤铜金矿区成矿潜力预测[J]. 矿床地质, 33(增): 1005-1006.

方向, 唐菊兴, 宋杨, 杨超, 丁帅, 王艺云, 王勤, 孙兴国, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 杨欢欢, 高轲, 唐攀. 2015. 西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义[J]. 地球学报, 36(2): 168-176.

冯孝良, 杜光树. 1999. 西藏金矿资源分布规律、矿化类型及找矿方向[J]. 特提斯地质, 29 35-42.

李光明, 张林奎, 张志, 夏祥标, 梁维, 侯春秋. 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产:勘查进展、资源潜力与找矿方向[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 351-360.

李永灿, 黄瀚霄, 刘洪, 吕梦鸿, 兰双双. 2017. 班公湖-怒江成矿带金成矿规律及成矿作用初讨[J]. 沉积与特提斯地质, 37(2):1-13.

李玉彬, 钟婉婷, 郭建慈, 秦志鹏, 张志, 李建力, 邓时强, 李玉昌. 2019. 西藏班公湖-怒江成矿带西段拿厅斑岩Cu(Au)矿床的火成岩岩石成因与成矿物质来源[J]. 岩石学报, 35: 1717-1737.

林彬, 方向, 王艺云, 杨欢欢, 贺文. 2019. 西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿含矿斑岩岩石成因及其对多龙地区早白垩世成矿动力学机制的启示[J]. 岩石学报, 35(3): 642-664.

刘恒福, 徐云甫, 李善平. 2017. 三十九种元素的分组及元素地球化学[M]. 北京:地质出版社. 129页.

刘英俊, 马东升.1991. 金的地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 374页.

秦克章, 李光明, 张旗, 李金祥, 缪宇, 肖波, 张天平, 多吉, 李金高, 陆彦. 2007. 西藏浅成低温金-银矿的成矿条件与可能产出区分析——从斑岩-浅成低温铜金成矿系统的角度[A]. 主编:陈毓川, 毛景文, 薛春纪. 第八届全国矿床会议论文集[C]. 北京:地质出版社. 666-670.

曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, (7): 792-799.

佘宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 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, 28(6): 737-746.

宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 王登红, 辛洪波, 杨超, 林彬, 范淑芳. 2014. 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, 29(7): 795-809.

宋扬, 杨欢欢, 林彬, 刘治博, 王勤, 高轲, 杨超, 方向. 2017. 青藏高原羌塘地体南缘浅成低温热液成矿系统的保存机制及其重要意义——以铁格隆南超大型矿床为例[J]. 地球学报, 38(5): 659-669.

宋扬, 曾庆高, 刘海永, 刘治博, 李海峰, 德西央宗. 2019. 班公湖-怒

http://www.kcdz.ac.cn

江洋形成演化新视角:兼论西藏中部古-新特提斯转换[J]. 岩石学报, 35(3): 625-641.

宋扬, 李发桥, 郑明, 孙豪, 方颖. 2021. 藏北改则县多龙地区砂金来源研究[J]. 地质论评, 67(增): 155-156.

孙豪, 宋扬, 郑明, 方颖. 2021. 西藏多龙矿集区尕尔勤铜金矿砂金矿物学特征及意义[J]. 地质论评, 67(增): 179-180.

唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 王勤, 王艺云, 杨超, 陈红旗, 李彦波, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 宋俊龙, 杨欢欢, 段吉琳, 高轲, 方向, 谭江云. 2014a. 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, 35(1): 6-10.

唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014b. 青藏高原两个斑岩浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿"之实践[J]. 矿床地质, 33(6):1151-1170.

唐菊兴, 宋扬, 王勤, 林彬, 杨超, 郭娜, 方向, 杨欢欢, 王艺云, 高轲, 丁帅, 张志, 段吉琳, 陈红旗, 粟登逵, 冯军, 刘治博, 韦少港, 贺文, 宋俊龙, 李彦波, 卫鲁杰. 2016. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(6): 663-690.

唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-613.

唐菊兴. 2019. 青藏高原及邻区重要成矿带矿产资源基地调查与研究进展[J]. 岩石学报, 35(3): 617-624.

王勤, 唐菊兴, 陈毓川, 侯俊富, 李彦波. 2019. 西藏多龙超大型铜(金)矿集区成矿模式与找矿方向[J]. 岩石学报, 35(3): 879-896.

王松, 赵元艺, 汪傲, 李玉彬, 李小赛, 郭硕. 2017. 西藏拿顿铜(金)矿床岩矿相学、流体包裹体和地球化学特征与成矿作用研究[J]. 地质学报, 91: 1565-1588.

张志, 方向, 唐菊兴, 王勤, 杨超, 王艺云, 丁帅, 杨欢欢. 2017. 西藏多龙矿集区尕尔勤斑岩铜矿床年代学及地球化学——兼论硅帽的识别与可能的浅成低温热液矿床[J]. 岩石学报, 33(2): 476-494.

中国地质科学院地矿所. 1977. 砂矿物鉴定手册[M]. 北京:地质出版社. 241 页.

祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌. 2011. 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, 27(7): 2159-2164.

祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 马东方, 李光明, 黄瀚霄, 张红, 刘朝强, 卫鲁杰. 2015. 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, 89(3): 534-548.

http://www.kcdz.ac.cn/