

# 中国贵州与美国内华达卡林型金矿对比及对找矿 勘查的指示作用\*

谢卓君<sup>1</sup>, 夏 勇<sup>1\*\*</sup>, Jean Cline<sup>2</sup>, 谭亲平<sup>1</sup>, 李松涛<sup>1,3,4</sup>, 赵亦猛<sup>1,3</sup>, 韦东田<sup>5</sup>,  
王泽鹏<sup>4</sup>, 闫 俊<sup>6</sup>

(1 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2 内华达大学拉斯维加斯分校, 美国 内华达 拉斯维加斯 891541; 3 中国科学院大学, 北京 100039; 4 贵州省地矿局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018; 5 桂林理工大学, 广西 桂林 541006; 6 贵州理工学院, 贵州 贵阳 550003)

**摘 要** 文章从区域地质及矿床地质等方面对内华达和贵州卡林型金矿进行详细的总结和对比, 结果表明两地金矿有很多相似, 也有很多差异。主要的相似性包括: 两地构造背景演化均经历了早期拉张裂陷、沉积一套被动大陆边缘海相沉积地层、之后造山挤压和晚期拉张; 矿体主要受富铁地层和构造控制; 与金矿化相关的蚀变作用均有硫化、去碳酸盐岩化、硅化和泥化; 金主要以不可见金赋存于含砷黄铁矿中; 晚期雄黄、雌黄、辉锑矿、方解石等矿物以脉状充填在开放空间。重要差别体现在: 矿床区域分布控制因素; 绝大部分贵州金矿矿床范围内未见岩浆岩; 贵州金矿特有的白云石化以及相对较弱的去碳酸盐化、硅化(似碧玉岩)和泥化; 载金黄铁矿的形貌和微量元素含量; 部分贵州金矿含成矿期-成矿晚期毒砂; 贵州有大量晚期石英-(方解石)脉; 贵州成矿流体更富集 CO<sub>2</sub>, 且具有更高的温度、压力和 pH 值。相似性和差异性的鉴定对于卡林型金矿(尤其是贵州卡林型金矿)找矿勘查具有重要指示作用。斜坡相地层是卡林型金矿最好的赋矿层位, 卡林型金矿勘查中需要多关注斜坡相地层, 尤其是富铁斜坡相地层。近期在贵州玄武岩分布区的区域不整合面(又称“构造蚀变体”, 即 SBT)中, 金矿勘查取得重大突破, 玄武岩富含铁, 是一种潜在的卡林型金矿赋矿岩性。在贵州地区, 识别茅口组 and 龙潭组(或峨眉山玄武岩)之间的 SBT 及 SBT 上部的构造高点对于台地相区的区域金矿勘查至关重要。识别切割泥盆纪碳酸盐岩台地的区域同沉积断裂, 对于调查矿床的区域分布(尤其是盆地相中金矿的区域分布)非常关键。大量似碧玉岩露头或者石英-方解石脉表明该区发生了大量的水-岩反应, 预示周围可能有大规模成矿作用发生。辉锑矿、雄黄、雌黄等成矿晚期矿物多以脉状充填在矿体周围的开放空间, 比矿体的分布范围更广, 对矿体有很好的指示意义。

**关键词** 地质学; 贵州卡林型金矿; 内华达卡林型金矿; 对比研究; 卡林型金矿勘查  
**中图分类号**: P618.51 **文献标志码**: A

## A comparison between Carlin-type Au deposits in Guizhou of China and Nevada of USA and its implications for exploration

XIE ZhuoJun<sup>1</sup>, XIA Yong<sup>1</sup>, CLINE Jean<sup>2</sup>, TAN QinPing<sup>1</sup>, LI SongTao<sup>1,3,4</sup>, ZHAO YiMeng<sup>1,3</sup>, WEI DongTian<sup>5</sup>,  
WANG ZePeng<sup>4</sup> and YAN Jun<sup>6</sup>

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2 University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, Nevada, 89154, USA; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4 No.105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang

\* 本文得到国家重点研发计划(编号:2016YFC0600607)、国家自然科学基金(编号:U1812402; 41703046; 41803046; 41802088)、中科院西部之光青年学者项目、贵州省教育厅项目(编号:0201003016017)、贵州省科技计划项目(编号:黔科合平台人才[2018]5765)和贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(编号:黔地矿科合[2016]12号)联合资助

第一作者简介 谢卓君,男,1987年生,助理研究员,主要从事卡林型金矿研究。Email:chdxiezhuojun@126.com

\*\* 通讯作者 夏 勇,1960年生,研究员,主要从事卡林型金矿研究。Email:xiayong@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2018-09-28; 改回日期 2019-03-28。张绮玲编辑。

550018, Guizhou, China; 5 Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 6 Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, Guizhou, China)

### Abstract

Carlin-type Au deposits, mainly located in Nevada of the USA and Southwest Guizhou Province of China, constitute one of the most important Au deposit types in the world. In this study, the authors summarized and compared the architecture and ore deposit geology of Carlin-type Au deposits in Nevada, USA and southwest Guizhou Province, China, and investigated their similarities and differences. Similarities include: ① both regions experienced rifting, passive-margin sequence deposition, orogenic deformation, and late extension; ② orebody is controlled by Fe-rich lithology and structure; ③ alteration related to Au mineralization includes sulfidation, decarbonatization, silicification, and argillization; ④ most of Au is invisible in arsenian pyrite; and ⑤ late-ore-stage minerals, including dominantly realgar, orpiment, stibnite, and calcite, precipitated in open space. Key differences between the deposits in Guizhou and Nevada include: ① factors controlling the regional distribution of Au deposits in the two regions are different; ② there are no magmatic rocks spatially or temporally related to most of the Guizhou deposits; ③ there exist ore-forming stage dolomite and weaker decarbonatization, silicification, and argillization in Guizhou deposits; ④ ore pyrite morphology and chemistry are different; ⑤ there exist minor ore-forming and late ore-forming stage arsenopyrite in some Guizhou deposits; ⑥ there exist abundant late ore-forming stage quartz-(calcite) veins in Guizhou deposits; and ⑦ under the conditions of higher temperature and pressure, there exist more CO<sub>2</sub> and less acidity of Guizhou ore fluids. The identified similarities and differences have potential applications to Carlin-type Au deposit exploration in the world, especially in the Guizhou area. Slope-facies strata, especially Fe-rich strata, are ideal host rocks for Carlin-type deposits, thus future exploration should focus on the Fe-rich, slope-facies strata. Recent exploration identified several Carlin-type Au deposits hosted in the unconformity (SBT) and basalt above the unconformity in western Guizhou. Basalt is enriched in Fe, and therefore it is a potential host rock for Guizhou Carlin-type Au deposits. In addition, the authors suggest that, in the Guizhou platform-facies area, identifying the unconformity between the Moukou and Longtan (or Emeishan basalt) Formations and the culminations above the unconformity is critical for Au exploration. Recognizing the synsedimentary faults along the Devonian carbonate platform is the key to understanding the Au deposit distribution in Guizhou area, especially in the Guizhou basin-facies area. Abundant jasperoid and/or quartz-(calcite) veins indicate large-scale water-rock reaction, and may indicate the nearby presence of Au mineralization. Late ore-forming stage stibnite, realgar, orpiment commonly precipitated in the open space near and around the orebody, thus may suggest the nearby presence of Au mineralization.

**Key words:** Geology, Guizhou Carlin-type Au deposit, Nevada Carlin-type Au deposit, comparative study, Carlin-type Au deposit exploration

“卡林型金矿”的概念来源于美国内华达州卡林镇。其实早在20世纪初该区的一些卡林型金矿就被发现并开始开采(如:1917年发现了White Cap金矿;1922年发现了Gold Acres金矿;1934年发现了Getchell金矿),但是“卡林型金矿”作为一种新的金矿类型直到1961年才被划分。这主要是由于1961年在内华达州卡林镇发现了卡林金矿,并且意识到早期发现或开采的金矿与卡林金矿具有高度相似性,而且与其他类型金矿具有显著的差异,因而将这

些金矿床定义为一种新的类型——“卡林型金矿”(Radtke, 1985; Muntean et al., 2018)。

继“卡林型金矿”概念提出后,全世界很多地方都报道有金矿与内华达卡林型金矿具有相似的成矿特征,并认为是卡林型金矿,包括印度尼西亚(Turner et al., 1994; Percival et al., 2018)、伊朗西北部(Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 2000; Daliran et al., 2018)、中国西南部(Hu et al., 2002, 2017; 黄庆文等, 2009; Su et al., 2018)、中国陕甘川交界区(Mao

et al., 2002)和加拿大 Yukon 等地区 (Arehart et al., 2013; Tucker et al., 2018)。贵州西南地区于 1978 年首次发现板其金矿,其成矿特征与内华达卡林型金矿高度相似,因而被认为是卡林型金矿。之后在滇黔桂交界区发现了大量该类型金矿(大部分金矿位于贵州西南地区,以下统称为“贵州卡林型金矿”)。

卡林型金矿一直以来受到高度关注,其中一个重要原因就是该类金矿床常呈簇、呈带分布,并具有高品位、大吨位特征,因而具有很高的经济价值。目前世界上已发现的卡林型金矿矿集区主要是美国内华达和中国贵州地区。其中,内华达卡林型金矿矿集区是世界上最大的卡林型金矿矿集区(金累计储量 8000 吨),也是世界上第二大金矿矿集区(仅次于南非),每年的金产量占全世界金总产量的 6% (Muntean et al., 2018);贵州卡林型金矿矿集区金的累计储量已超过 800 t,其中包含水银洞和锦丰 2 个超大型金矿 (Hu et al., 2017; Su et al., 2018; Xie et al., 2018a)。

本文拟对上述 2 个最大的卡林型金矿矿集区中的金矿床从区域地质背景及矿床地质方面进行总结和对比。以期对找矿勘查提取指示作用的信息,为卡林型金矿找矿勘查提供参考意见。其中,本文的对比部分是在 Xie 等 (2018a)发表在 *Reviews in Economic Geology* 上的专辑文章的基础上,进行了更加全面的综合及找矿勘查指示作用的对比。

## 1 区域地质背景对比

### 1.1 矿床区域分布

卡林型金矿常集中产出或成群分布。内华达卡林型金矿主要分布在 5 个成矿带/区内,分别为:Carlin、Getchell 和 Battle Mountain-Eureka 成矿带,以及 Jerritt Canyon 和 Alligator Ridge 成矿区(图 1)。内华达卡林型金矿呈簇呈带分布主要是受早期切穿基底的深大断裂所控制,这些深大断裂控制后期卡林成矿流体的运移和矿床的分布 (Cline et al., 2005; Muntean et al., 2011)。与内华达卡林型金矿不同的是,贵州卡林型金矿呈环岛状或带状分布于右江盆地中 (黄庆文等, 2009; 图 2)。在右江盆地的深水相区,金矿主要沿着早期孤立碳酸盐岩台地的边缘分布,孤立碳酸盐岩台地与深水相地层之间的同沉积断层控制着金矿的分布;在右江盆地的浅水台地相

区,茅口组和龙潭组(或峨眉山玄武岩)之间的区域不整合面(SBT)对金矿床的分布起着至关重要的作用(刘建中等, 2010)。金矿床主要受 SBT 及其上部的大型宽缓背斜或者穹隆所控制,主要分布在构造高点位置。

### 1.2 构造演化

Xie 等(2018a)对内华达和贵州两地的构造演化进行了详细的总结,简述如下。从新元古代到早古生代,内华达地区处于北美克拉通的西缘。该区的地质特征受控于北美克拉通的地质演化过程。在新元古代,北美克拉通由于拉张作用形成一系列高角度正断层;拉张作用之后,该区沉积了一套具被动大陆边缘性质的海相沉积岩。海相沉积之后,该区经历了一系列的区域压性造山运动。这些区域压性构造运动将内华达西边的化学性质不活跃的硅质岩逆冲于东边化学性质活跃的粉砂质碳酸盐岩之上 (Roberts et al., 1958; Stewart, 1980; 图 1)。同时,这些压性构造运动还形成了一系列不整合构造和区域性复式褶皱 (Roberts et al., 1958)。晚三叠世, Farallon 板块俯冲于北美板块之下 (Humphreys, 1995, 2008; Dickinson, 2004)。板块俯冲诱发了大量弧岩浆,主要为闪长岩和花岗闪长岩 (Mortensen et al., 2000; Ressel et al., 2006)。一直到 65 Ma, Farallon 板块变为平板俯冲,结束了该区俯冲作用导致的岩浆活动 (Coney et al., 1977)。中始新世(45 Ma), Farallon 俯冲板块回撤或拆沉,内华达地区的构造作用由压性构造运动转为张性构造运动 (Humphreys, 1995; 2008),并引发了大量高钾钙碱性岩浆作用。这些岩浆岩从内华达北部持续到南部,并且年龄逐渐变小 (Armstrong et al., 1991; Seedorff, 1991; Ressel et al., 2006; Muntean et al., 2011)。卡林型金矿形成于 42~36 Ma (Hofstra et al., 1999; Tretbar et al., 2000; Arehart et al., 2003),且金矿成矿年龄从北向南也逐渐变小,在时间和空间上与上从北向南的岩浆岩高度一致 (Muntean et al., 2011)。

贵州卡林型金矿主要分布在右江盆地中(图 2)。右江盆地的演化历史非常复杂,不同学者对盆地的类型划分存在较大差异。柳淮之等(1986)认为右江地区为陆内裂谷。曾允孚等(1995)认为早期是裂谷盆地,晚期为弧后盆地。杜远生等(2013)认为早期为裂谷盆地,晚期进入前陆盆地。尽管各学者对右江盆地的属性认识不一致,但都认为右江地区经历了早期拉张裂陷、沉积海相地层以及晚期的挤压造

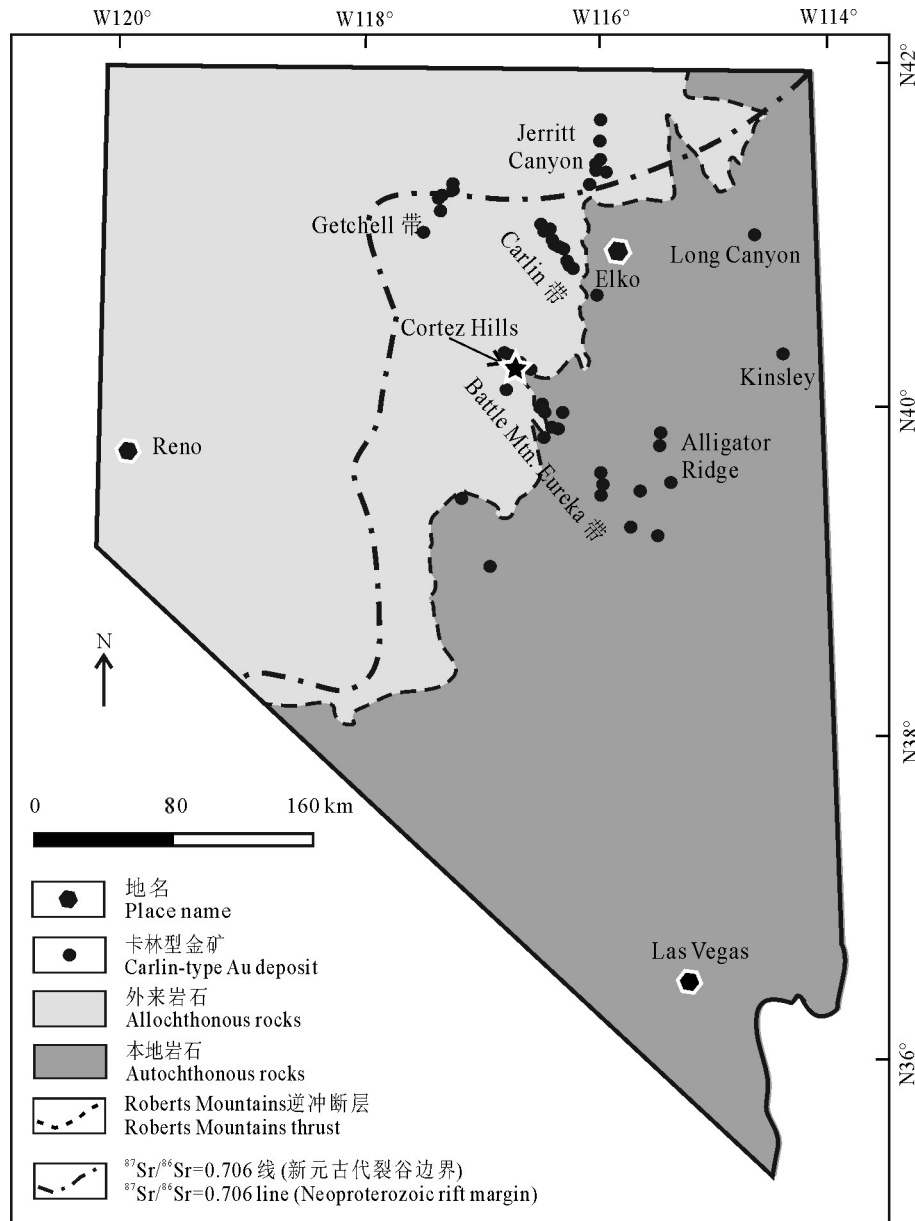


图1 美国内华达卡林型金矿分布图(据 Hofstra et al., 2000; Maroun et al., 2017)

Fig. 1 Geological map showing distribution of Carlin-type gold deposits in Nevada, the USA (after Hofstra et al., 2000; Maroun et al., 2017)

山和造山后的伸展拉张。早泥盆世,右江地区开始强烈拉张裂陷,形成了台地-台盆相间的盆地格局(广西壮族自治区地质矿产局,1985;Hu et al., 2002; Chen et al., 2011;杜远生等,2013)。从泥盆纪到三叠纪,右江地区沉积了一套巨厚海相沉积岩。杜远生等(2013)认为,石炭纪初期右江盆地和越北地块之间存在一个与古特提斯洋相关的分支洋。从晚二叠世开始,随着古特提斯洋的俯冲,右江盆地接

受来自华南大陆和火山岛弧物质的碎屑供应,形成中三叠世巨厚的复理石沉积。深部的板块俯冲作用在前部沉积地层中形成了大量的褶皱和断层构造。右江盆地内岩浆活动较弱。在盆地北部(图2),分布有少量大陆溢流相拉斑玄武岩,主要假整合于二叠系茅口组灰岩之上。这些玄武岩是峨眉山大火成岩省的组成部分。在盆地中部以及东南部有少量碱性超基性岩脉(85~88 Ma, Liu et al.,

2010) 和石英斑岩脉 ((95.5±0.7) Ma, 陈懋弘等, 2014), 这些岩脉被认为是燕山造山晚期盆地拉张背景下的产物(Liu et al., 2010)。在盆地的西南部(图 2), 分布有少量燕山晚期花岗岩(80 Ma, Cheng et al., 2010), 这些花岗岩多与锡多金属矿有成因关系, 并被认为是地壳熔融产物(Cheng et al., 2010)。

值得提出的是, 除了在盆地东南部的料屯金矿, 右江盆地中的绝大部分卡林型金矿与这些岩浆岩没有空间上的关系(图 2)。

### 1.3 区域地层

从新元古代(600 Ma)到泥盆纪(360 Ma), 内华达地区沉积了一套具有被动大陆边缘性质的海相沉

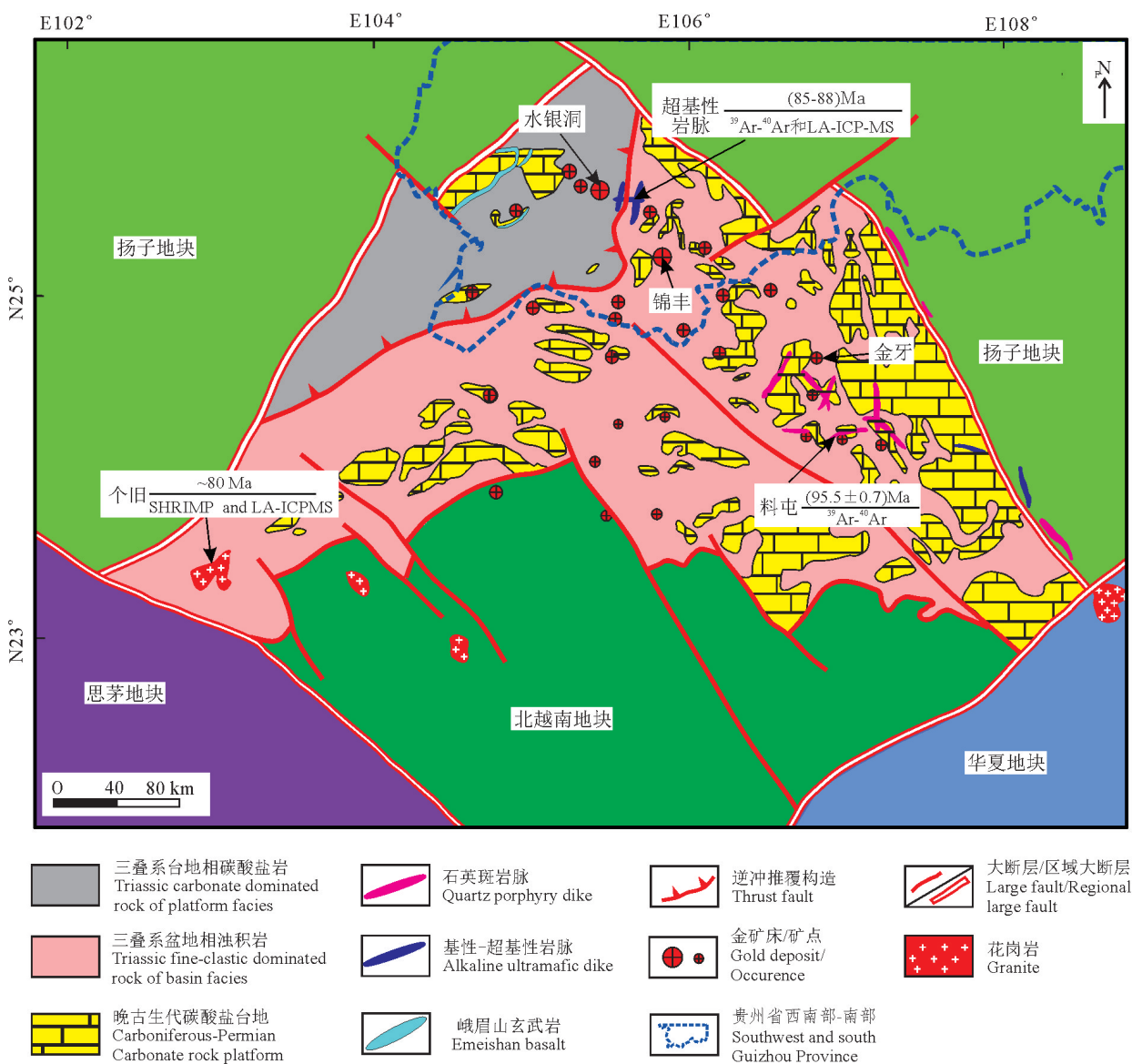


图 2 中国滇黔桂地区卡林型金矿分布图(据 Chen et al., 2015; Xie et al., 2018a)

超基性岩脉年龄据 Liu 等(2010), 方法为 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法和金云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法; 料屯石英斑岩脉年龄据陈懋弘等(2014), 方法为白云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法; 个旧花岗岩年龄据 Cheng 等(2010), 方法为 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法

Fig. 2 Regional geological map showing the distribution of Carlin-type gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi region (after Chen et al., 2015; Xie et al., 2018a)

The ages for ultrabasic dikes after Liu et al. (2010), and based on LA-ICP-MS zircon U-Pb and phlogopite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar techniques. The age for the quartz porphyry dike after Chen et al. (2014) and based on muscovite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analyses. Ages for granite after Cheng et al. (2010) and based on SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb techniques

积岩。在内华达西部,主要沉积了深水相沉积岩,包括硅质燧石、页岩,并含镁铁质火成岩夹层(Stewart, 1980; Cook, 2015)。在东部,沉积了一套浅水相粉砂质碳酸盐岩,主要包括灰岩、白云岩及少量页岩和砂岩(Stewart, 1980; Cook, 2015)。其中,泥盆系浅水相向深水相过渡的斜坡相地层是内华达卡林型金矿的主要赋矿层位(Cook, 2015)。最近在内华达东部,在浅水台地相地层中也发现了少量卡林型金矿(如:Kinsley, Long Canyon;见图1)。

在右江盆地地区,从泥盆纪到三叠纪沉积了一套巨厚海相沉积地层(6~12 km)。总的沉积趋势为:南盘江断裂以西北地区相对稳定,形成台地相区,断裂以东南地区为较大活动,形成台-盆相区(图2)。在西北部的台地相区,主要沉积了浅水相碳酸盐岩为主,并含陆源碎屑岩及二叠系峨眉山大陆溢流相玄武岩夹层(王砚耕, 1990; 韩至均等, 1999)。在东南部的台-盆相区,主要沉积了深水相沉积岩,包括黏土岩、钙质泥岩、粉砂岩、细砂岩、灰岩(王砚耕, 1990; 韩至均等, 1999)。目前已发现的卡林型金矿主要赋存于上二叠统一下三叠统台地相地层和中三叠统台-盆相地层中,在斜坡相地层中很少有卡林型金矿的发现和报道。

#### 1.4 区域构造

在内华达地区,早期深大断裂以及 Roberts Mountains 逆冲推覆构造对于卡林型金矿的形成和分布至关重要。新元古代时该区处于裂谷阶段,强烈的拉张作用形成一系列深切基底的高角度正断层(Poole et al., 1992; Dickinson, 2004; Cook, 2015),这些深大断裂不仅控制着后期的沉积作用,还控制着后期含金流体的上涌和运移(Cline et al., 2005),从而控制着卡林型金矿呈簇呈带分布。晚泥盆世到中密西西比世的 Antler 造山运动形成了 Roberts Mountains 逆冲推覆构造,该逆冲推覆构造将化学性质不活跃的硅质岩逆冲于化学性质活跃的粉砂质碳酸盐岩之上(Roberts et al., 1958; Stewart, 1980)。Roberts Mountains 逆冲推覆构造一方面是后期成矿流体运移的通道,另一方面由于其上覆地层为化学性质不活跃的硅质隔水层,从而控制着成矿流体横向运移,并且使得成矿流体与下伏化学性质活跃的钙质地层充分反应,从而形成大型金矿床。很多大型超大型卡林型金矿床均位于 Roberts Mountains 逆冲推覆构造的下伏地层 100 m 范围内(Cline et al., 2005)。

在贵州地区,基底断裂以及区域不整合面 SBT 对于金矿的形成和分布非常关键。早泥盆世,该区强烈的拉张裂陷形成了大量深切基底的断层,这些断裂导致了台地-台盆相间的盆地格局的形成。在后期的海相沉积过程中,同沉积断层沿着台地-台盆之间的深大断裂发育。这些深大断裂以及在其基础上发育起来的同沉积断层控制着后期成矿流体的垂向运移。由于深大断裂将泥盆纪以前的碳酸盐台地地层切割成段块状,因而后期的金矿床多沿着这种孤立碳酸盐台地边缘分布,这种现象在深水相区表现得尤为明显(图2)。在浅水台地相区,茅口组和龙潭组(或峨眉山玄武岩)之间的区域不整合面 SBT 对台地相区的金矿分布起着至关重要的作用。SBT 一方面控制着成矿流体的侧向运移,并且为成矿流体的继续上涌充当了储库作用;另一方面,SBT 本身就是矿体就位空间,大量金矿床赋存于其中。

## 2 矿床地质特征对比

### 2.1 赋矿岩性

卡林型金矿是热液交代矿床,对岩性有一定的选择性。尽管内华达和贵州卡林型金矿的赋矿地层的年代不同(内华达卡林型金矿主要为泥盆纪地层,贵州卡林型金矿主要为晚二叠世一早三叠世地层),但岩性非常相似,均主要为富 Fe 的不纯碳酸盐岩或钙质碎屑岩。这种岩石一方面本身孔隙度较高,有利于成矿流体的运移;另一方面富 Fe 的钙质岩石与偏酸性的贫铁成矿流体容易发生水-岩交代反应,从而形成矿体(Xie et al., 2018a)。如果矿体的顶、底板为隔水层(如:厚层泥岩),将促进流体与钙质地层充分反应,形成高品位矿体(如:贵州水银洞金矿生物碎屑灰岩矿体局部 Au 品位超过 100 g/t)(刘建中, 个人交流, 2018)。卡林型金矿对岩性的优先选择使得金矿体常为层控矿体(如:内华达 Betze-Post 金矿,贵州水银洞金矿;图3)。虽然大部分卡林型金矿赋存在碳酸盐岩或钙质碎屑岩中,但最近在贵州西部盘县的玄武岩中发现了架底、大麦地等一系列产于玄武岩中的卡林型金矿。这些金矿受茅口组灰岩与峨眉山玄武岩之间的构造蚀变体 SBT 和上部峨眉山玄武岩的控制,矿体主要赋存在玄武岩破碎带中。玄武岩中富铁,这对于贫铁的成矿流体要形成载金黄铁矿来说至关重要。

### 2.2 控矿构造

内华达和贵州卡林型金矿均受构造控制,尤其受高角度断层和背斜或穹隆的控制(图 3,图 4)。高

角度断层一方面是成矿流体垂向运移的主要通道,当流体在运移过程中遇到周围化学性质活跃的钙质地层,与其发生反应形成浸染状矿体;另一方面,断

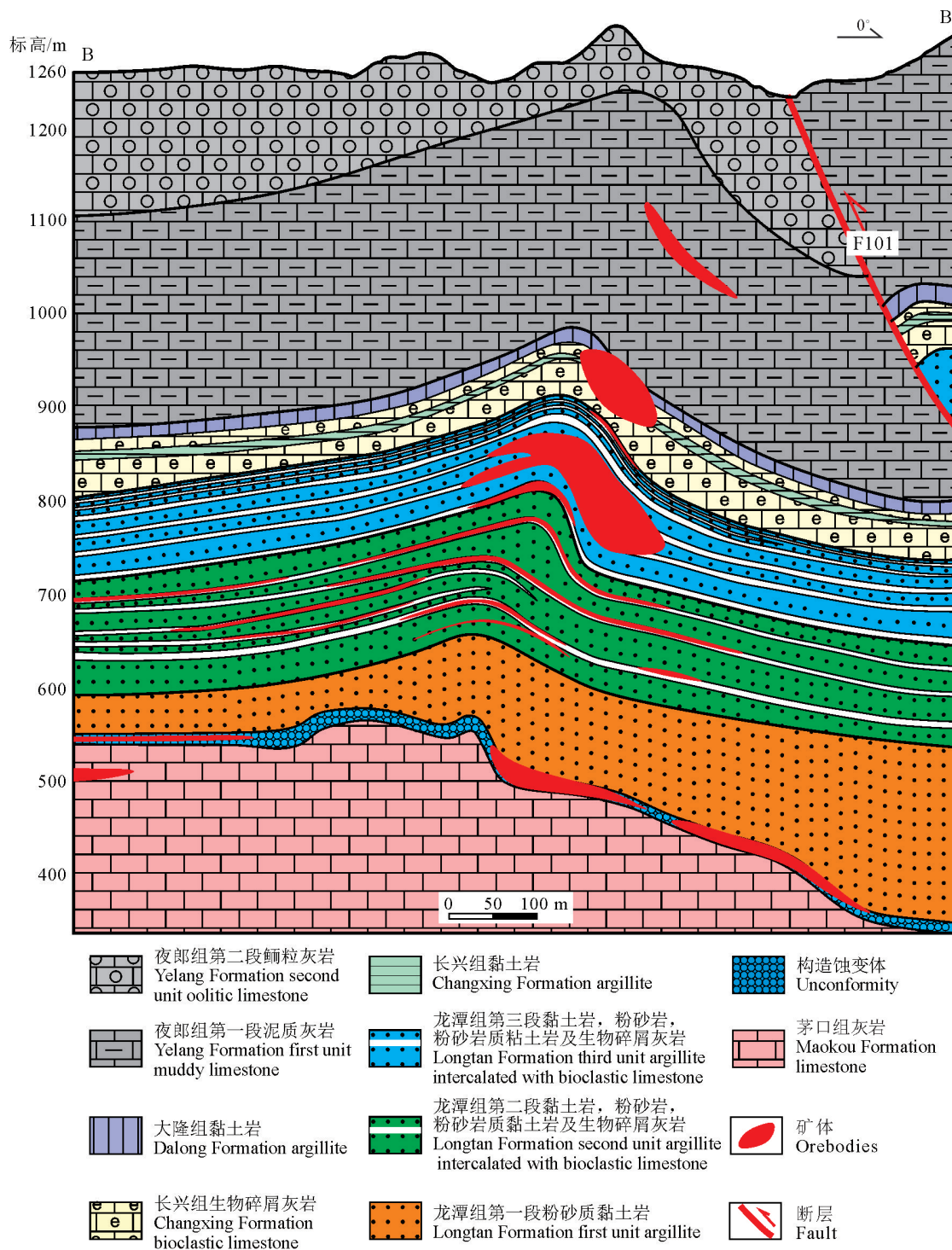


图 3 贵州水银洞金矿 B-B' 剖面图展示金矿化受背斜控制(据 Tan et al., 2015; Xie et al., 2018a)

Fig. 3 Geological cross section of the Shuiyindong deposit in Guizhou showing gold mineralization controlled by anticline (after Tan et al., 2015; Xie et al., 2018a)

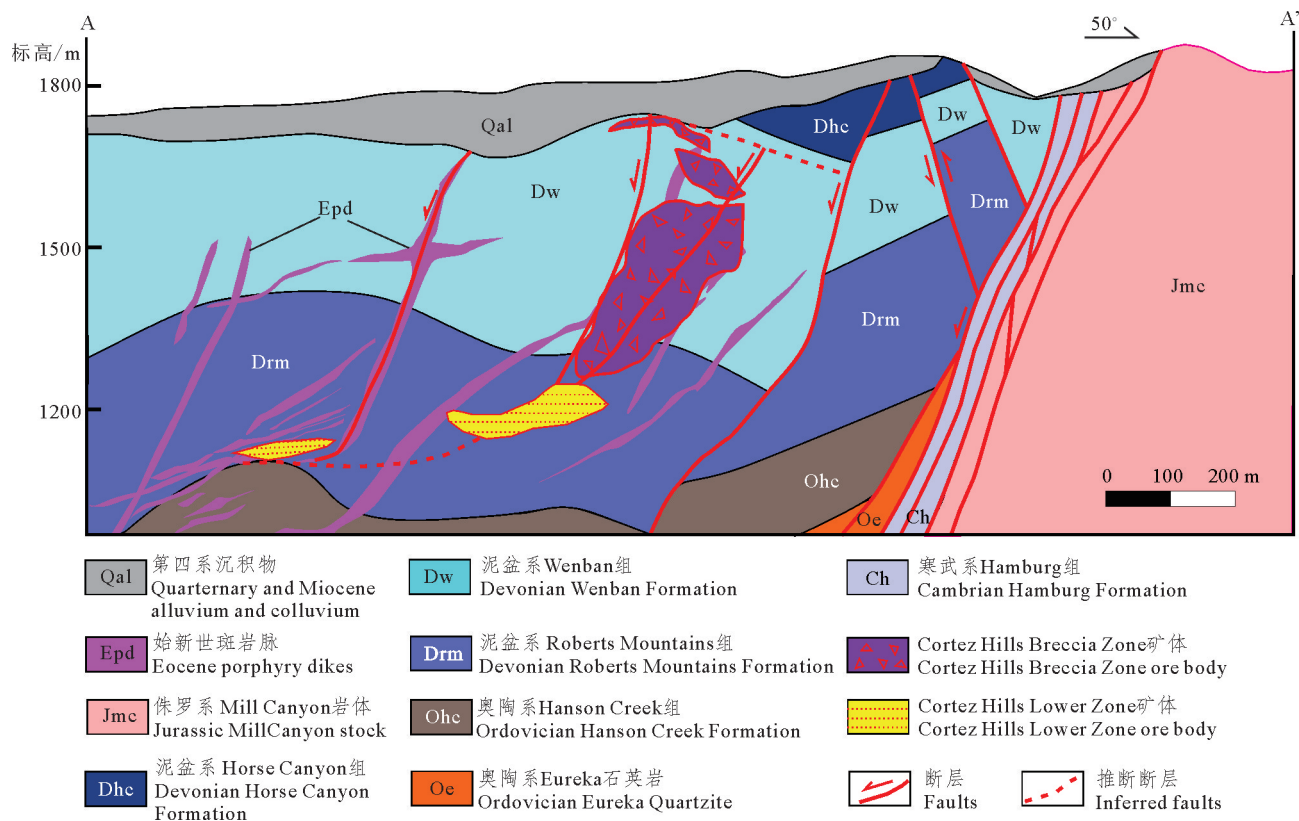


图4 内华达Cortez Hills金矿A-A'剖面展示金矿化受断层控制(据Maroun et al., 2017; Xie et al., 2018a)

Fig. 4 Geological A-A' cross section of the Cortez Hills deposit in Nevada showing gold mineralization controlled by faults (after Maroun et al., 2017; Xie et al., 2018a)

层带孔隙度高,且含大量钙质角砾或碎片,成矿流体极易与断层带中的钙质角砾或碎片发生水-岩交代反应,从而形成矿体(图4)。背斜和穹隆对矿化的控制作用主要体现在对成矿流体的汇聚和圈闭作用上。成矿流体常顺着断层向上运移,当遇到不透水层时则侧向运移,并在构造高点(如:背斜或穹隆)汇聚。在构造高点汇聚的成矿流体同时被构造高点所圈闭,不易流失,使成矿流体能与周围钙质地层充分发生水-岩交代反应,并在其附近形成矿体(如:贵州水银洞金矿背斜核部矿体;图3)。

### 2.3 蚀变作用

卡林型金矿在蚀变作用方面与其他热液矿床的重要不同之处就是卡林型金矿为低温热液交代矿床,矿石矿物和蚀变矿物均呈浸染状分布(图5a,图6a),并且未见蚀变矿物分带。蚀变矿物很难通过肉眼直接鉴定(图5a,图6a),需要结合详细的岩相学观察和地球化学数据才能准确鉴定。内华达卡林型金矿与金矿化相关的蚀变作用包括硫化、去碳酸盐化、

硅化和泥化(图5);贵州卡林型金矿与金矿化相关的蚀变作用除了硫化、去碳酸盐化、硅化和泥化,还有白云石化(图6;Xie et al., 2018a)。

硫化:在内华达金矿中,绝大部分含金黄铁矿由硫化作用形成。早期热液作用(如:sedex活动)将铁带入围岩,形成富铁围岩(如:含铁白云岩)(Hofstra et al., 1991; Emsbo, 1999; Emsbo et al., 2003),后期成矿流体硫化围岩中的铁,形成含金黄铁矿(图5e; Hofstra et al., 1991; Stenger et al., 1998; Kesler et al., 2003)。在贵州金矿中,硫化作用形成大部分含金黄铁矿,同时交代作用也形成少量含金黄铁矿(Xie et al., 2018a);围岩中的铁主要赋存于含铁白云石中,这些铁最可能形成于沉积或成岩过程。当成矿热液与含铁白云石反应,含铁白云石释放铁,形成白云石(图6c,d),同时释放的铁与流体中的硫形成含金黄铁矿(Xie et al., 2017; 2018a)。局部情况,含金流体与成矿前黄铁矿发生交代反应,金等成矿元素进入成矿前黄铁矿,成矿前黄铁矿被含金黄铁矿所交代



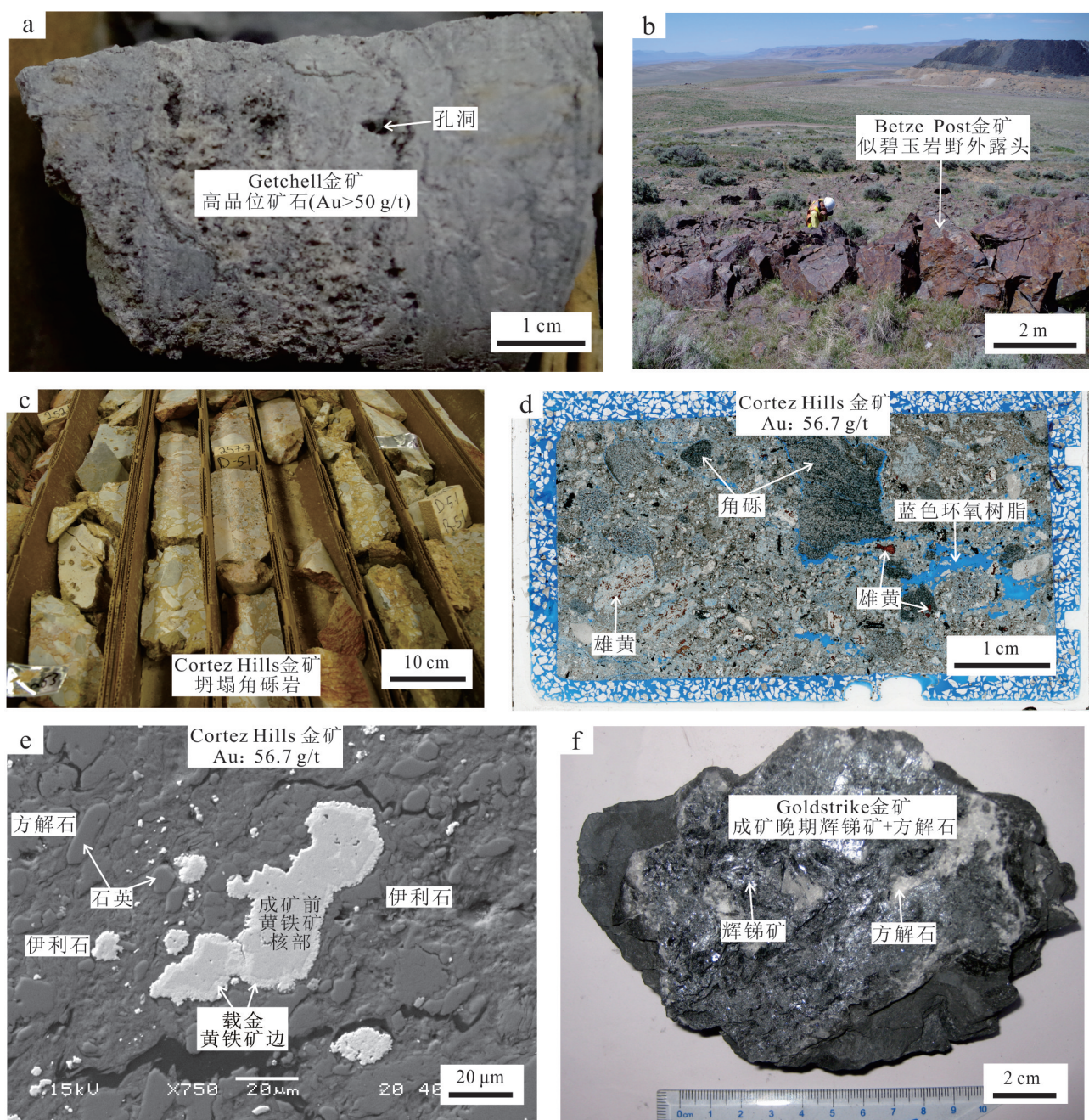


图5 内华达卡林型金矿蚀变及成矿晚期矿物特征

- a. Getchell 高品位矿石含大量由去碳酸盐化造成的溶蚀孔洞; b. Betze Post 矿体附近含有大量似碧玉岩露头,部分似碧玉岩中  $w(\text{Au})=n \times 10^{-6}$ ; c. Cortez Hills Breccia Zone 含有大量坍塌角砾岩,部分矿体赋存于坍塌角砾岩中; d. Cortez Hills 高品位矿石含有大量孔隙(蓝色环氧树脂位置),晚期雄黄充填在孔隙中(薄片扫描图); e. Cortez Hills 高品位矿石中含大量石英和伊利石,成矿期绒毛状黄铁矿围绕成矿前黄铁矿(扫描电镜背散射电子图); f. Goldstrike 成矿晚期辉锑矿和方解石呈脉状充填

Fig. 5 Images of alteration and late-ore-stage minerals from Nevada Carlin-type Au deposits

- a. High-grade ore sample from Getchell exhibiting porosity resulting from decarbonatization; b. Surface jasperoid from Betze Post located adjacent to ore, some of these jasperoids containing  $\text{Au}(n \times 10^{-6})$ ; c. Collapsed breccia from Cortez Hills, and some orebodies hosted in the breccia; d. High-grade ore from Cortez Hills showing abundant porosity (blue epoxy), and late-ore-stage realgar precipitating in the open space; e. High-grade ore from Cortez Hills exhibiting abundant quartz and illite, and fuzzy ore-stage pyrite rimming pre-ore pyrite; f. Late-ore stage stibnite and calcite from Goldstrike precipitating in the open space

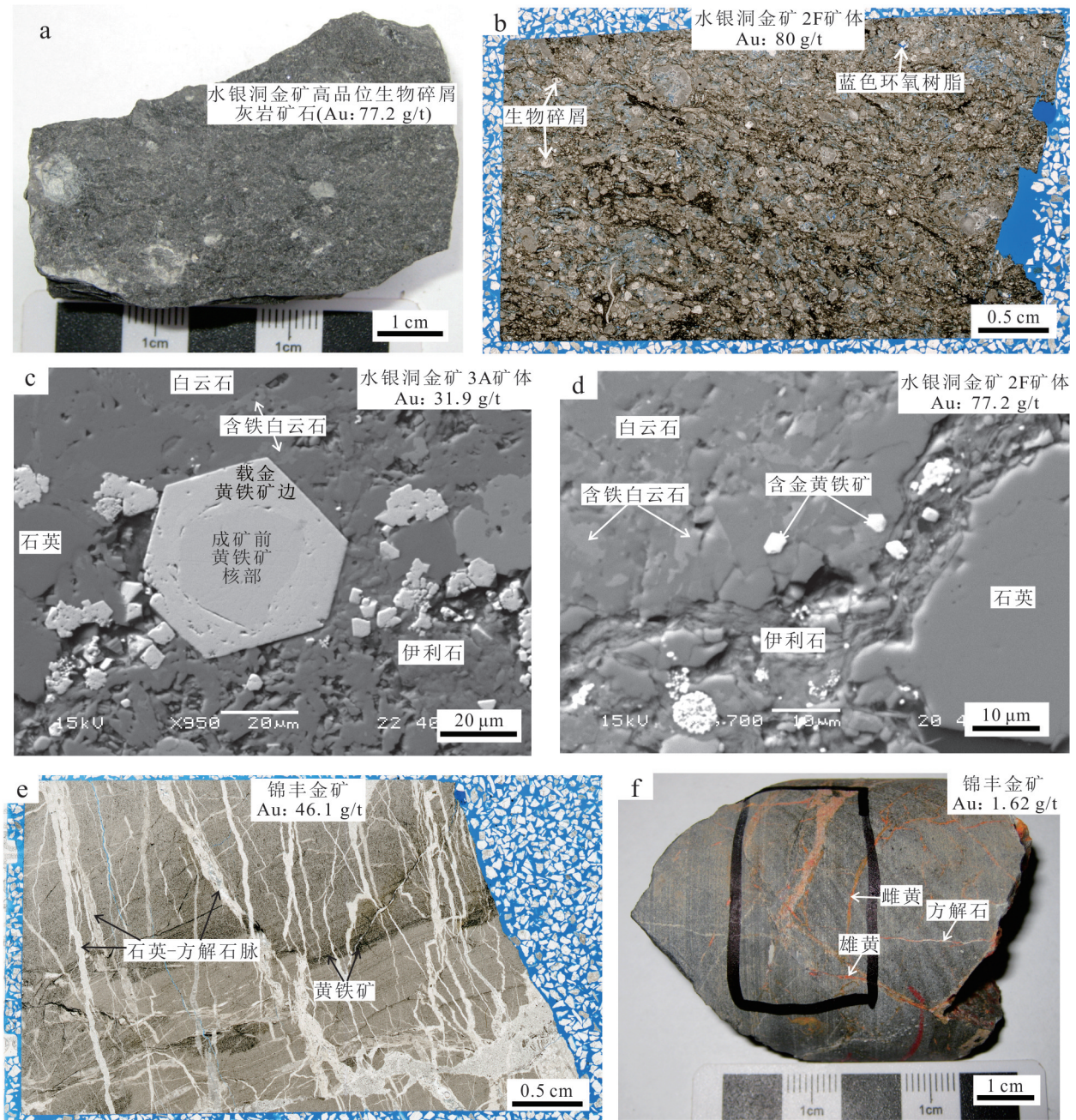


图6 贵州卡林型金矿蚀变及成矿晚期矿物特征

a. 水银洞块状致密状高品位生物碎屑灰岩矿石; b. 水银洞金矿高品位矿石含微量孔隙(蓝色环氧树脂指示孔隙)(薄片扫描图); c. 水银洞高品位矿石中含大量石英、白云石和少量伊利石,成矿期自形-半自形黄铁矿围绕成矿前黄铁矿(扫描电镜背散射电子图); d. 水银洞高品位矿石中含大量白云石,白云石包裹着他形含铁白云石(扫描电镜背散射电子图); e. 锦丰金矿高品位矿石被大量石英-方解石脉所切割,含金黄铁矿在角砾中,脉中未见黄铁矿(薄片扫描图); f. 锦丰成矿晚期雌黄、雌黄和方解石呈细脉状充填在开放空间(Xie et al., 2018a)

Fig. 6 Images of alteration and late-ore-stage minerals from Guizhou Carlin-type Au deposits

a. Massive bioclastic limestone ore from Shuiyindong; b. High-grade ore from Shuiyindong showing trace porosity (blue epoxy); c. High-grade ore from Shuiyindong containing abundant quartz, dolomite and minor illite, and subhedral-euhedral ore pyrite rimming pre-ore pyrite; d. High-grade ore from Shuiyindong containing abundant dolomite rimming anhedral Fe-dolomite; e. High-grade ore from Jinfeng crosscut by abundant late-ore-stage quartz and calcite veins, ore pyrite occurring in broken rock fragments and absent from the veins; f. Late-ore-stage realgar, orpiment, and calcite from Jinfeng precipitating in the open space (after Xie et al., 2018a)

(Xie et al., 2018a)。

**去碳酸盐化:**两地金矿化过程中都伴随着去碳酸盐化,但是内华达金矿中去碳酸盐化更加强烈,并且溶解的矿物种类不一样。在内华达金矿中,去碳酸盐化作用非常强烈(图5a, Cline et al., 2005),在高品位矿石中,几乎所有碳酸盐矿物(方解石、白云石、铁白云石等)都已溶解(图5e)。去碳酸盐化强烈地带常形成坍塌角砾岩(图4,图5c、d; Maroun et al., 2017)。然而在贵州金矿中,去碳酸盐化作用并不是很强烈(图6a、b),主要表现为方解石发生溶解,而金矿化过程中形成的白云石并未发生溶解(图6c、d)。

**硅化:**在两地金矿床中都是重要的蚀变过程。在内华达金矿中,硅化分布范围更广,强度更强,似碧玉岩不仅硅化方解石(Hofstra et al., 2000),同时硅化白云石(例如:Meikle金矿, Emsbo, 1999)。似碧玉岩露头在矿区范围内广泛分布(图5b),因而在卡林型金矿勘探中,似碧玉岩是该类矿床的主要找矿标志之一(Arehart et al., 2013)。然而在贵州金矿中,硅化主要表现为似碧玉岩硅化方解石,但是白云石和铁白云石并没有被硅化。到目前为止,贵州金矿矿床范围内并没有出露大范围似碧玉岩露头。

**泥化:**泥化在内华达金矿中表现为形成大量成矿期伊利石和少量高岭石,在贵州金矿中表现为形成少量成矿期伊利石。在内华达,酸性成矿流体与含钾硅酸盐矿物反应,形成大量伊利石(图5e)。在Carlin(Kuehn et al., 1992)和Deep Star(Heitt et al., 2003)矿床中,酸性流体与围岩反应,形成成矿期高岭石。在贵州,并未见到成矿期高岭石,只有微量-少量成矿期伊利石(图6c、d)。总体上,碎屑岩比灰岩矿体含有更多的成矿期伊利石,这可能是碎屑岩中含有更多的含钾硅酸盐矿物(如:白云母,钾长石),这些含钾矿物与成矿流体反应,形成伊利石。

**白云石化:**内华达金矿未见成矿期白云石,而在贵州金矿中,金矿化伴随着强烈的白云石化(图6c、d)。在贵州,成矿流体与铁白云石反应,铁白云石释放铁,形成白云石,与此同时铁与成矿流体中的硫形成含金黄铁矿,并与白云石共生(图6c、d; Xie et al., 2018a)。贵州金矿中含有大量的成矿期白云石和部分残留铁白云岩,这表明贵州成矿流体中的pH值可能为近中性(Xie et al., 2017; 2018a)。

这种pH值近中性的成矿流体能溶解方解石但不能溶解白云石。此外,贵州成矿流体富含CO<sub>2</sub>(Zhang et al., 2003; Su et al., 2009),富CO<sub>2</sub>流体可能抑制了白云石的溶解,甚至有可能成矿流体中的CO<sub>2</sub>加入到岩石中,形成成矿期白云石(Xie et al., 2017; 2018a)。

## 2.4 金的赋存状态

金在微米-亚微米尺度下(观测最小粒度直径0.1 μm)不可见是卡林型金矿的一个重要特征。虽然个别矿床报道了少量自然金颗粒(Su et al., 2008),但不管是内华达卡林型金矿还是贵州卡林型金矿,金主要以“不可见”金赋存于含砷黄铁矿中。“不可见”金是以纳米金(Au<sup>0</sup>)还是晶格金赋存于含砷黄铁矿中目前还没有非常一致的认识。Palenik等(2004)利用TEM对美国Screamer卡林型金矿高品位矿石进行了详细研究,观察到大量纳米金颗粒(Au<sup>0</sup>),因而认为纳米颗粒金在卡林型金矿中占了很重要一部分。

Reich等(2005)根据美国内华达卡林型金矿中载金含砷黄铁矿的Au-As含量并结合TEM观测结果,推导出经验公式: $C_{Au}=0.02 \times C_{As} + 4 \times 10^{-5}$ ,并认为:当含砷黄铁矿中的 $n(Au)/n(As) > 0.02$ ,金以纳米颗粒金(Au<sup>0</sup>)出现; $n(Au)/n(As) < 0.02$ ,金以晶格金(Au<sup>+1</sup>)出现。卡林型金矿的 $n(Au)/n(As)$ 绝大部分小于0.02,因而认为金主要以晶格金(Au<sup>+1</sup>)赋存于含砷黄铁矿中,并占据Fe的位置。

## 2.5 载金矿物

贵州含金黄铁矿和内华达含金黄铁矿在形貌和微量元素含量上有差异(Xie et al., 2018a),主要表现为:①贵州含金黄铁矿通常为自形-半自形晶(图6c),而内华达含金黄铁矿为“绒毛状”黄铁矿(图5e);②两地含金黄铁矿均富集As、Cu、Hg、Sb和Tl等微量元素,但内华达含金黄铁矿中的这些微量元素比贵州含金黄铁矿中的要高很多,分别为: Au(3.3倍)、As(3.4倍)、Sb(5.6倍)、Hg(12.9倍)、Tl(19.1倍)、Cu(2.8倍)(Xie et al., 2018a)。另外,在部分贵州卡林型金矿中,毒砂也是一种重要的载金矿物(如广西金牙金矿)。然而,成矿期毒砂在内华达卡林型金矿中很少见。

## 2.6 成矿晚期矿物

卡林型金矿的成矿晚期代表成矿体系的冷却和坍塌(Hofstra et al., 1991; Cline et al., 2005; Xie et al., 2018a)。不像成矿期矿物呈浸染状分布,成矿晚期

矿物大多以脉状充填在矿体及周围的破碎带中(图5d、f,图6e、f)。贵州和内华达卡林型金矿主要的晚期矿物有雄黄、雌黄、辉锑矿和方解石。重要差别主要体现在以下3方面:

(1) 贵州金矿中见晚期毒砂,而内华达矿床中未见晚期毒砂;

(2) 在贵州金矿中,有大量晚期石英-(方解石)脉切割矿体(如:锦丰金矿;图6e),而在内华达矿床中很少见到脉石英;

(3) 在贵州金矿中,富卡林元素(As、Hg、Tl、Cu、Sb及Te)的成矿晚期矿物主要为雄黄、雌黄和辉锑矿,但很少见到科罗拉多矿、硫砷汞铜矿、斜硫砷汞铜矿和硫砷汞矿,而在内华达,这些矿物在部分矿床中确实出现(Maroun et al., 2017)。这些晚期矿物的出现与内华达含金黄铁矿中异常富集As、Hg、Tl、Sb、Cu、及Te相一致,这同时也表明内华达晚期成矿流体较贵州晚期成矿流体更加富集这些元素(Xie et al., 2018a)。

## 2.7 成矿物化条件

成矿物理化学条件主要是通过对成矿期流体包裹体以及矿物共生组合的研究而确定。对于内华达卡林型金矿,成矿期似碧玉岩中流体包裹体研究表明成矿流体的温度为180~240℃,并具有低盐度( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为4%~6%)、低挥发分和还原性特点(Cline et al., 2000; Hofstra et al., 2000; Lubben et al., 2012)。强烈的去碳酸盐化表明成矿流体的pH值较低,为酸性流体。流体包裹体研究、磷灰石裂变径迹研究及古地貌重建研究(Hickey et al., 2003)表明,内华达金矿形成深度为0.3~3 km,个别矿深度稍微深一些,为5 km(如: Getchell; Cline et al., 2005)。

与内华达卡林型金矿相似,贵州成矿期石英脉中流体包裹体研究表明成矿流体具有低盐度(水银洞: $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为0.9%~2.3%, Su et al., 2009; 锦丰: $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) < 5%$ , Zhang et al., 2003)特点,但更富 $\text{CO}_2$ (水银洞: $x(\text{CO}_2)=6.3\% \sim 8.4\%$ , Su et al., 2009; 锦丰: $x(\text{CO}_2)=7\% \sim 75\%$ , Zhang et al., 2003),且可能具有更高的温度(水银洞:190~230℃, Su et al., 2009; 锦丰:240~300℃, Zhang et al., 2003)。同时,贵州金矿流体包裹体研究表明其成矿压力更高,矿床形成深度更深(水银洞:45~115 MPa,对应深度为1.7~4.3 km, Su et al., 2009; 锦丰:150~230 MPa,对应深度为5.5~8.9 km, Zhang et al., 2003)。贵州卡林型金矿在矿化

过程中,方解石发生溶解与此同时形成白云石说明成矿流体的pH值为近中性。总之,相比于内华达卡林型金矿,贵州卡林型金矿的形成温度稍高,形成深度更深,流体pH值更高。

## 2.8 成矿模式

卡林型金矿的成矿模式(尤其是贵州卡林型金矿)到目前为止还没有形成统一的认识,主要是对成矿流体的来源还有争议。目前对成矿流体的来源有3种认识,分别为:岩浆热液来源(Muntean et al., 2011; Large S et al., 2016; Xie et al., 2018b)、变质热液来源(Large R et al., 2011; Su et al., 2009; 2018)及盆地水萃取地层成矿物质(Chen et al., 2015; Hu et al., 2017)。但对于成矿流体的运移以及金的沉淀过程,目前已经形成比较一致的观点。

在内华达地区,成矿流体可能是与俯冲板片回撤/拆沉而形成的岩浆上升到距离地表10 km处释放而形成的(Muntean et al., 2011),也有可能由于变质作用释放而形成的(Large et al., 2011)。在42 Ma时,大盆地处于拉张背景,这种低温度和压力、低盐度、酸性成矿流体中含有大量的Au、As、Hg、Cu、Tl和Sb,与碳酸盐岩发生反应,导致碳酸盐岩溶解,同时形成微量元素富集的含金黄铁矿、伊利石和似碧玉石英。局部情况,去碳酸盐化作用非常强烈,导致形成坍塌角砾岩。在成矿晚期,随着成矿体系冷却,雄黄、方解石、雌黄、辉锑矿及微量硫砷汞矿、硫砷汞铜矿、斜硫砷汞矿及科罗拉多矿等矿物以脉状形式充填在围岩裂隙中,或围绕成矿期矿物。

在贵州地区,深部岩浆(Xie et al., 2018b)或者变质作用(Su et al., 2009)释放成矿流体,或者岩浆热驱动盆地水萃取地层成矿物质形成成矿流体(Hu et al., 2017)。相比内华达矿床的成矿流体,贵州矿床的成矿流体具有更高的温度和压力,更高的pH值,含更多的 $\text{CO}_2$ ,相似的盐度,且流体中Au、As、Hg、Tl、Cu和Sb的含量较低。这种pH近中性的成矿流体与碳酸盐岩反应,导致方解石溶解,铁白云石释放铁形成白云石,同时,形成含金黄铁矿、似碧玉石英和少量伊利石。大部分含金黄铁矿由于流体硫化铁白云石中的铁而形成。局部情况,流体与成矿前黄铁矿反应,Au、As、Hg、Cu、Tl和Sb加入到成矿前黄铁矿中,形成少量交代型含金黄铁矿。在成矿晚期,形成大量方解石、石英、雄黄及少量雌黄和辉锑矿,它们多以脉状充填在

裂隙中或切割矿体。此外,部分矿床,在成矿期和成矿晚期会形成毒砂。

### 3 对比结果对卡林型金矿勘查的指示作用

中、美卡林型金矿的对比研究表明,两地金矿有很多相似性,同时也有很多差异(表1)。相似性主要包括:构造背景演化(均经历了克拉通裂解,接着沉积了一套具有被动边缘性质的沉积地层,之后两地都经历了一系列的造山运动,并且两地区都经历了俯冲作用及晚期的拉张作用);矿体常受富铁地层和构造联合控制;与金矿化相关的蚀变作用均有硫化、去碳酸盐化、硅化和泥化;金主要以不可见金赋存于含砷黄铁矿中;晚期辉锑矿、雄黄、雌黄等矿物以脉状形式充填在开放空间(Xie et al., 2018a)。

重要差别体现在:矿床区域分布控制因素不一样;贵州地区巨厚的沉积地层(6~12 km)和造山期后盆地的拉张作用不强烈,导致金矿床范围内很少见岩浆岩;贵州金矿特有的白云石化以及较弱的去碳

酸盐化、硅化和泥化;贵州载金黄铁矿为自形-半自形载金黄铁矿,且微量元素含量较低;贵州金矿有成矿期和成矿晚期毒砂;贵州金矿常见大量晚期石英-(方解石)脉;贵州成矿流体更富集CO<sub>2</sub>、更高的温度、压力和pH值(Xie et al., 2018a)。这些相似性和差异性对于世界上不同地区卡林型金矿(尤其是贵州地区卡林型金矿)的找矿勘探具有参考意义。

#### 3.1 对贵州地区卡林型金矿勘查的指示作用

对于贵州卡林型金矿,在浅水台地相区,区域不整合面SBT对金矿的分布至关重要。识别SBT的分布范围及SBT之上的构造高点(如:背斜和穹隆)对于区域找矿非常有益。另外,在台地相区,由于早期的区域同沉积断层大部分被沉积地层所覆盖,但这些断层对成矿流体的垂向上涌非常关键,确定这些区域同沉积断层的位置很重要。目前已发现的深水盆地相区的金矿主要受孤立碳酸盐台地与深水相地层之间的同沉积断层控制。因此,今后金矿勘查要沿着早期孤立碳酸盐台地的边缘进行。

在贵州地区,目前发现的金矿均主要赋存于盆

表1 内华达卡林型金矿与贵州卡林型金矿对比

Table 1 Comparison between Nevada and Guizhou Carlin-type Au deposits

对比项目	内华达卡林型金矿	贵州卡林型金矿
矿床分布	受早期切穿基底的深大断裂所控制,呈簇呈带分布	浅水相区,金矿大多沿大型宽缓背斜/穹隆核部分布;深水相区,金矿大多沿早期孤立碳酸盐台地的边缘分布
构造演化	新元古代到早古生代拉张裂陷,沉积一套具有被动边缘性质的钙质地层;之后经历了系列挤压造山作用,形成导矿和容矿构造;中始新世,处于伸展拉张状态;金矿形成于伸展拉张背景。	早泥盆纪,强烈拉张裂陷,形成了台地-台盆相间的盆地格局;从泥盆纪到三叠纪,沉积巨厚海相沉积地层,其中盆地西北部主要为浅水台地相沉积,东南部主要为深水硅质-泥质岩沉积;中三叠,挤压造山,造山后伸展拉张。由于金矿年龄有争议,金矿形成时的背景还很难确定
区域赋矿地层	主要为泥盆系浅水相向深水相过渡的斜坡相地层	主要为上二叠统一下三叠统台地相地层和中三叠统台-盆相地层
区域构造	大型-超大型卡林型金矿主要位于Roberts Mountains逆冲推覆构造下伏地层100 m范围内	浅水相区,茅口组和龙潭组(或峨眉山玄武岩)之间的区域不整合面SBT及其上部构造高点控制金矿的分布;深水相区,区域同沉积断层控制金矿的分布
赋矿岩性	主要为富Fe不纯碳酸盐岩或钙质碎屑岩	主要为富Fe不纯碳酸盐岩或钙质碎屑岩,最近发现一些金矿赋存于玄武岩中
控矿构造	受高角度断层和背斜或穹隆控制	受不整合面、高角度断层和背斜或穹隆控制
蚀变作用	硫化、去碳酸盐化、硅化和泥化	硫化、去碳酸盐化、白云石化、硅化和泥化。相比内华达金矿,贵州金矿去碳酸盐化、硅化和泥化要弱很多,同时白云石化是贵州金矿特有的蚀变作用
金的赋存状态	主要以不可见金赋存于含砷黄铁矿中	主要以不可见金赋存于含砷黄铁矿中,部分不可见金赋存于毒砂中
载金矿物	主要为含砷黄铁矿;含金黄铁矿呈绒毛状,富集Au、As、Sb、Hg、Tl和Cu	主要为含砷黄铁矿,部分金矿毒砂也是重要的载金矿物。含金黄铁矿呈自形-半自形,富集Au、As、Sb、Hg、Tl和Cu,但这些元素的含量比内华达含金黄铁矿低很多
成矿晚期矿物	方解石、雄黄、辉锑矿和雌黄,少量富含Hg、Tl、Te、Cu、及Sb的晚期矿物(如:科罗拉多矿、硫砷汞铜矿、斜硫砷汞矿、硫砷汞铜矿)	大量石英-(方解石)脉,雄黄,以及少量辉锑矿、雌黄和毒砂
成矿物化条件	酸性(低pH)、低温(180~240℃)、低盐度( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 4%~6%)、还原性成矿流体;矿床形成深度0.3~3 km,个别深达5 km	近中性pH值、中-低温(约190~300℃)、低盐度( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 1%~5%)、富CO <sub>2</sub> 还原性成矿流体;矿床形成深度为2~9 km
成矿模式	深源岩浆/变质作用释成矿流体模式	深源岩浆/变质作用释成矿流体模式,或盆地水萃取地层成矿物质模式

地相地层(如:锦丰金矿)和台地相地层中(如:水银洞金矿)。其实在对于卡林型金矿,斜坡相地层才是最好的赋矿层位(大部分内华达卡林型金矿赋存在斜坡相地层中),因为斜坡相地层其孔隙度更高,有利于流体的运移,并且富碳质和钙质,更加容易与成矿流体反应。鉴于卡林成矿流体贫铁,当斜坡相地层中富含铁时,这将成为理想的赋矿地层。在贵州地区,斜坡相地层的分布范围目前还有争议。王砚耕等(1994)认为台地相和盆地相之间存在一个逆冲推覆构造,导致斜坡相地层被覆盖。Zhang等(2003)认为贵州可能不存在大面积斜坡相地层,台地相和盆地相之间可能只是相变。笔者认为尽管贵州斜坡相地层可能不像内华达那样分布范围广,但台地相和盆地相之间的过渡带以及盆地相中的泥盆纪孤立碳酸盐岩台地的边缘可能存在斜坡相地层。因此,在贵州地区,确定斜坡相地层,并在富Fe斜坡相地层中寻找金矿值得考虑。另外,近期在贵州西部玄武岩分布区的SBT中找金矿取得突破。玄武岩中富铁,这对于贫铁的卡林成矿流体形成载金黄铁矿至关重要。贵州西部玄武岩分布广泛,今后应考虑在玄武岩分布区中的SBT中找金矿。

在贵州地区,虽然去碳酸盐化较弱,但如果在野外发现(大量)似碧玉岩露头,说明其深部或者周围发生了大规模的硅化作用(在内华达,似碧玉岩是一种重要的找矿标志),因而,不要忽略野外似碧玉岩的露头。贵州金矿表现为在矿床范围内或者周围含有大量的石英-方解石脉,表明发生了大量的水-岩相互作用,因此,大量的方解石-石英脉周围可能发生了大规模的成矿作用。Tan等(2017)通过系统分析贵州水银洞金矿一典型剖面中方解石脉的稀土元素和C-O同位素组成,发现相比于与成矿无关的方解石脉,与成矿相关的方解石具有富集中稀土元素和重的O同位素组成,以及较轻的C同位素组成等特点。因而,对方解石脉的稀土元素和C-O同位素组成分析将能有效判别深部矿化信息。另外,晚期硫化物矿物(如:辉锑矿、雄黄、雌黄等)多以脉状充填在矿体周围的开放空间,并且比矿体的分布范围更广,因而对矿体也有很好的指示意义。

### 3.2 对内华达地区卡林型金矿勘查的指示作用

在内华达地区,以往的卡林型金矿勘探主要针对该州中北部斜坡相地层。最近,在内华达州东部临近犹他州地区发现了Long Canyon和Kinsley金

矿。与其他内华达卡林型金矿不同点是,这2个矿均赋存在台地相地层中。并且,相比于内华达典型的卡林型金矿,Long Canyon和Kinsley很多成矿特征更像贵州卡林型金矿,尤其像水银洞金矿。因此,在内华达东部台地相地区,要更加关注与贵州卡林型金矿(尤其像水银洞金矿)成矿特征类似矿床的找矿勘查。即使没有大量似碧玉岩的出露,但是当地表有Au、As、Cu、Sb、Hg、Tl等元素的异常,并有厚层泥岩夹薄层灰岩,同时有很好的导矿和容矿构造,其深部可能会有隐伏金矿体。

### 3.3 对新区开展卡林型金矿勘查的指示作用

在一个新区进行卡林型金矿勘查时,首先要考虑的是该区的区域地质背景,如该区是否经历了早期拉张裂隙,接着沉积一套具有被动边缘性质的钙质地层,之后又经历了系列造山挤压作用,晚期处于拉张状态。

第二个需要考虑的是该区是否有大范围碳酸盐岩或钙质碎屑岩沉积。尽管有少量卡林型金矿赋存在其他岩性中,但由于中酸性卡林成矿流体最容易与碳酸盐岩或钙质碎屑岩发生交代反应,因而矿体优先赋存在这些地层中。

第三个需要考虑的是该区是否存在区域导矿构造以及是否有好的圈闭/容矿构造。卡林型金矿是热液交代矿床,区域导矿构造对于流体的上涌和运移很重要;圈闭/容矿构造对于控制成矿流体与化学性质活跃的钙质地层发生充分交代反应至关重要。

第四个需要考虑的是区域上是否有Au、As、Sb、Cu、Hg、Tl等元素的组合异常。Au、As、Sb、Cu、Hg和Tl是卡林型金矿的指示元素,这些元素/元素组合异常对于圈定找矿远景区/靶区非常重要。

**致谢** 感谢中科院地球化学研究所苏文超研究员,贵州省地矿局刘建中研究员、李俊海高工和杨成富高工,以及内华达大学雷诺分校John Muntean副教授的多次有益讨论。此外,感谢三位匿名审稿人提出的宝贵意见和建议。

### References

- Arehart G B, Chakurian D, Tretbar J, Christensen B, McInnes R and Donelick A. 2003. Evaluation of radioisotope dating of Carlin-type deposits in the Great Basin, western North America, and implications for deposit genesis[J]. *Econ. Geol.*, 98(2): 235-248.

- Arehart G B, Ressel M, Carne R and Muntean J. 2013. A comparison of Carlin-type deposits in Nevada and Yukon[C]. Society of Economic Geologists, Special Publication. 17: 389-401.
- Armstrong R L and Ward P L. 1991. Evolving geographic patterns of Cenozoic magmatism in the North American Cordillera: The temporal and spatial association of magmatism and metamorphic core complexes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96: 201-224.
- Asadi H H, Voncken J H L, Kühnel R A and Hale M. 2000. Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Zarshuran Carlin-type gold deposit, Iran[J]. *Mineralium Deposita*, 35: 656-671.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985. Regional geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House. 96p (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Mao J W, Bierlein F P, Norman T and Uttley P J. 2011. Structural features and metallogenesis of the Carlin-type Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 217-234.
- Chen M H, Zhang Y, Meng Y Y, Lu G and Liu S Q. 2014. The confirmation of the upper limit of metallogenetic epoch of Liaotun gold deposit in western Guangxi, China, and its implication on chronology of Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle" area[J]. *Mineral Deposits*, 33: 1-13(in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Zhang Z Q, Santosh M, Dang Y and Zhang W. 2015. The Carlin-type gold deposits of the "golden triangle" of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 115-128.
- Cheng Y B and Mao J W. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan Province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 120: 258-276.
- Cline J S and Hofstra A H. 2000. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA[J]. *European Journal of Mineralogy*, 12(1): 195-212.
- Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, Tosdal R M and Hickey K A. 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models[J]. *Econ. Geol.* 100th anniversary volume: 451-484.
- Coney P J and Reynolds S J. 1977. Cordilleran benioff zones[J]. *Nature*, 270: 403-406.
- Cook H E. 2015. The evolution and relationship of the western North American Paleozoic carbonate platform and basin depositional environments to Carlin-type gold deposits in the context of carbonate sequence stratigraphy[A]. In: Pennell W M and Garside L J, eds. *New concepts and discoveries*[C]. Geological Society of Nevada 2015 Symposium Proceeding, Reno, Nevada. 1-80.
- Daliran F, Hofstra A H, Walther J and Topa D. 2018. Ore genesis constraints on the Agdarreh and Zarshouran Carlin-style gold deposits in the Takab region of northwestern Iran[J]. In: Muntean J L, ed. *Diversity in Carlin-style gold deposits*, *Reviews in Econ. Geol.*, 20: 299-33.
- Dickinson W. 2004. Evolution of the North American Cordillera[J]. *Annual Review Earth Planet Science*, 32: 13-45.
- Du Y S, Huang H, Yang J H, Huang H W, Tao P, Huang Z Q, Hu L S and Xie C X. 2013. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the Youjiang basin and its tectonic signification[J]. *Geological Review*, 59(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Emsbo P. 1999. Origin of the Meikle high grade gold deposit from the superposition of Late Devonian Sedex and mid-Tertiary Carlin-type gold mineralization[D]. Unpublished Ph. D. dissertation, Golden, Colorado School of Mines.
- Emsbo P and Hofstra A H. 2003. Origin and significance of postore dissolution Collapse breccias cemented with calcite and barite at the Meikle gold deposit, northern Carlin Trend, Nevada[J]. *Econ. Geol.*, 98(6): 1243-1252.
- Han Z J, Wang Y G, Feng J Z, Chen T J, Luo X H and Liu Y H. 1999. The geology and exploration of gold deposits in southwestern Guizhou, China[M]. Guizhou Science and Technology Press. 146p(in Chinese with English abstract).
- Heitt, D G, Dunbar W W, Thompson T B and Jackson R G. 2003. Geology and geochemistry of the Deep Star gold deposit, Carlin trend, Nevada[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1107-1136.
- Hickey K A, Donelick R A, Tosdal R M and McInnes B I A. 2003. Restoration of the Eocene landscape in the Carlin-Jerritt Canyon mining district: Constraining depth of mineralization for Carlin-type Au-deposits using low-temperature apatite thermochronology[C]. Geological Society of America Abstracts with Program.
- Hofstra A H, Leventhal J S, Northrop H R, Landis G P, Rye R O, Birak D J and Dahl A R. 1991. Genesis of sediment-hosted disseminated-gold deposits by fluid mixing and sulfidization: Chemical-reaction-path modeling of ore-depositional processes documented in the Jerritt Canyon district, Nevada[J]. *Geology*, 19(1): 36-40.
- Hofstra A H, Snee L W, Rye R O, Folger H W, Phinisey J D, Loranger R J, Dahl A R, Naeser C W, Stein H J and Lewchuk M. 1999. Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the western United States-relationship to Mid-Tertiary extension and magmatism[J]. *Econ. Geol.*, 94: 769-802.
- Hofstra A H and Cline J S. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[C]. In: Vikre P, Thompson T B, Bettles K, Christensen O, Parratt R, eds. *Gold in 2000*, Society of Econ. Geol. Reviews, 13: 163-220.
- Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu G Z and Hofstra A H. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. *Mineralium Deposita*, 37(3-4): 378-392.
- Hu R Z, Fu S L, Huang Y, Zhou M F, Fu S H, Zhao C H, Wang Y J, Bi X W and Xiao J F. 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 9-34.
- Huang Q W, Liu S Q and Ding L. 2009. Comparative study of Carlin-type gold deposits in Youjiang Basin, P. R. China and Great Basin of Nevada, USA[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(3): 193-203(in Chinese with English abstract).

- Humphreys E D. 1995. Post Laramide removal of the Farallon slab, western United States[J]. *Geology*, 23: 987-990.
- Humphreys E D. 2008. Cenozoic slab windows beneath the western United States[A]. In: Spencer J E and Tittley S R, eds. *Arizona geological society digest* 22[C]. Tucson, Arizona, USA.
- Kesler S E, Fortuna J, Ye Z, Alt J C, Core D P, Zohar P, Borhauer J and Chryssoulis S L. 2003. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold, Screamer section of the Betze-Post Carlin-type deposit, Nevada[J]. *Econ. Geol.*, 98: 137-1157.
- Kuehn C A and Rose A R. 1992. Geology and geochemistry of wall-rock alteration at the Carlin gold deposit, Nevada[J]. *Econ. Geol.*, 87: 1697-1721.
- Large R R, Bull S W and Maslennikov V V. 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits[J]. *Econ. Geol.*, 106: 331-358.
- Large S J E, Bakker E Y N, Weis P, Wälle M, Ressel M and Heinrich C A. 2016. Trace elements in fluid inclusions of sediment-hosted gold deposits indicate a magmatic-hydrothermal origin of the Carlin ore trend[J]. *Geology*, 44(12): 1015-1018.
- Liu H Z, Zhong Z Y and Yao M. 1986. Preliminary study of Youjiang rift zone[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 6(1): 9-19(in Chinese with English abstract).
- Liu J Z, Yang C F, Xia Y, Chen S, Chen F E, You B and Fu Z K. 2010. Sbt study and ideas in platform lithofacies area in the southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 27(3): 178-184(in Chinese with English abstract).
- Liu S, Su W C, Hu R Z, Feng C X, Gao S, Coulson I M, Wang T, Feng G Y, Tao Y and Xia Y. 2010. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China[J]. *Lithos*, 114: 253-264.
- Lubben J D, Cline J S and Barker S L L. 2012. Ore fluid properties and sources from quartz-associated gold at the Betze-Post Carlin-type gold deposit, Nevada, United States[J]. *Econ. Geol.*, 107: 1351-1385.
- Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, Zhang Z C, Garwin S and Ren F S. 2002. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, Central China[J]. *Mineralium Deposita*, 37: 352-377.
- Maroun L R C, Cline J S, Simon A, Anderson P and Muntean J L. 2017. High-grade gold deposition and collapse brecciation, Cortez Hills Carlin-type gold deposit, Nevada, USA[J]. *Econ. Geol.*, 112: 707-740.
- Mehrabi B, Yardley B W D and Cann J R. 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran[J]. *Mineralium Deposita*, 34: 673-696.
- Mortensen J K, Thompson J F H and Tosdal R M. 2000. U-Pb age constraints on magmatism and mineralization in the northern Great Basin, Nevada[A]. In: Cluer J K, Price J G, Struhsacker E M, Hardyman R F and Morris C L, eds. *Geology and ore deposits 2000: The Great Basin and Beyond*[C]. Geological Society of Nevada 2000 Symposium Proceedings, Reno, Nevada: 419-438.
- Muntean J L, Cline J S, Simon A C and Longo A A. 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits[J]. *Nature Geoscience*, 4: 122-127.
- Muntean J L and Cline J S. 2018. Introduction diversity of Carlin-style gold deposits[J]. In: Muntean J L, ed. *Diversity of Carlin-style gold deposits*[C]. *Reviews in Econ. Geol.*, 20: 1-5.
- Palenik C S, Utsunomiya S, Reich M, Kesler S E, Wang L and Ewing R C. 2004. "Invisible" gold revealed: Direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit[J]. *American Mineralogist*, 89: 1359-1366.
- Percival T J, Hofstra A H, and Radtke A S. 2018. Sedimentary rock-hosted gold deposits related to epizonal intrusions, Bau District, Island of Borneo, Sarawak, East Malaysia[J]. In: Muntean J L, ed. *Diversity of Carlin-Style Gold Deposits, Reviews in Econ. Geol.*, 20: 259-297.
- Poole F G, Stewart J H, Palmer A R, Sandberg C A, Madrid R J, Ross R J, Hintze L F, Miller M M and Wrucke C T. 1992. Latest Precambrian to latest Devonian time; development of a continental margin[A]. In: Burchfield B C, Lipman P W and Zoback M L, eds. *The Cordilleran Orogen: Conterminous U. S.* [M]. Boulder, Colorado, Geological Society of America, *The Geology of North America*: 9-56.
- Radtke A S. 1985. *Geology of the Carlin gold deposit, Nevada*[M]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1267: 1-124.
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chryssoulis S L and Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 2781-2796.
- Ressel M W and Henry C D. 2006. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada: Development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits[J]. *Econ. Geol.*, 101: 347-383.
- Roberts R, Hotz P, Gilluly J and Ferguson H. 1958. Paleozoic rocks in north-central Nevada[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 42: 2813-2857.
- Seedorff E. 1991. Magmatism, extension, and ore deposits of Eocene to Holocene age in the Great Basin-Mutual effects and preliminary proposed genetic relationships[A]. In: Raines G L, Lisle R E, Schafer R W and Wilkinson W H, eds. *Geology and ore deposits of the Great Basin*[C]. Geological Society of Nevada 1990 Symposium Proceedings, Reno, Nevada: 133-178.
- Stenger D P, Kesler S E, Peltonen D R and Tapper C J. 1998. Deposition of gold in Carlin-type deposits: The role of sulfidation and decarbonation at Twin Creeks, Nevada[J]. *Econ. Geol.*, 93: 201-215.
- Stewart J H. 1980. *Geology of Nevada*[M]. Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication 4.
- Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C and Hu R Z. 2008. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 33: 667-679.
- Su W C, Heinrich C A, Pettke T, Zhang X C, Hu R Z and Xia B. 2009. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of



- wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Econ. Geol.*, 104: 73-93.
- Su W C, Dong W D, Zhang X C, Shen N P, Hu R Z and Hofstra A H. 2018. Carlin-style gold deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of southwest China[J]. In: Muntean J L, ed. Diversity of Carlin-style gold deposits. *Reviews in Econ. Geol.*, 20: 157-185.
- Tan Q P, Xia Y, Xie Z J and Yan J. 2015. Migration paths and precipitation mechanisms of ore-formation fluid at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 140-156.
- Tan Q P, Xia Y, Wang X Q, Xie Z J and Wei D T. 2017. Carbon-oxygen isotopes and rare earth elements as an exploration vector for Carlin-type gold deposits: A case study of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou Province, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148: 1-12.
- Tretbar D, Arehart G B and Christensen J N. 2000. Dating gold deposition in a Carlin-type gold deposit using Rb/Sr methods on the mineral galkhaite[J]. *Geology*, 28: 947-950.
- Tucker M J, Lane J C and Hart C J R. 2018. Overview of Carlin-type prospects of the Nadaleen trend: A Yukon analogue to Carlin-type gold mineralization of the Great Basin[J]. In: Muntean J L, ed. Diversity of Carlin-style gold deposits, *Reviews in Econ. Geol.*, 20: 235-258.
- Turner S J, Flindell P A, Hendri D, Hardjana I, Lauricella P F, Lindsay R P, Marpaung B and White G P. 1994. Sediment-hosted gold mineralization in the Ratatotok district, North Sulawesi, Indonesia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 50: 317-336.
- Wang Y G. 1990. Two gold-bearing sequences and their sedimentary environments in southwestern Guizhou and its adjacent areas[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 6: 8-13(in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Suo S T, Zhang M F, et al., 1994. Tectonics and Carlin-type gold deposits in southwestern Guizhou[M]. Beijing: Geological Publishing House. 115p(in Chinese with English abstract).
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Yan B W, Wang Z P, Tan Q P and Wei D T. 2017. Comparison of the native antimony-bearing Paiting gold deposit, Guizhou Province, China with Carlin-type gold deposits, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 52: 69-84.
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Alan K, Wei D T, Tan Q P and Wang Z P. 2018a. Are there Carlin-type Au deposits in China? A comparison between the Guizhou China and Nevada USA Deposits[J]. In: Muntean J L, ed. Diversity of Carlin-Style Gold Deposits, *Reviews in Econ. Geol.*, 20: 187-233.
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Michael P, Alan K, Tan Q P, Wei D T, Wang Z P and Yan J. 2018b. Magmatic origin for sediment-hosted Au deposits, Guizhou Province, China: In-situ chemistry and sulfur isotopic composition of pyrites, Shuiyindong and Jinfeng deposits[J]. *Econ. Geol.*, 113: 1627-1652.
- Zeng Y F, Liu W J, Chen H D, Zheng R C, Zhang J Q, Li X Q and Jiang T C. 1995. Evolution on sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 113-124(in Chinese with English abstract).
- Zhang X C, Spiro B, Halls C, Stanley C and Yang K Y. 2003. Sediment-hosted disseminated gold deposits in southwest Guizhou, PRC: Their geological setting and origin in relation to mineralogical, fluid inclusion, and stable-isotope characteristics[J]. *International Geology Review*, 45: 407-470.

#### 附中文参考文献

- 陈懋弘, 张延, 蒙有言, 陆刚, 刘苏桥. 2014. 桂西巴马料屯金矿床成矿年代上限的确定——对滇黔桂“金三角”卡林型金矿年代学研究的启示[J]. *矿床地质*, 33(1): 1-13.
- 杜远生, 黄虎, 杨江海, 黄宏伟, 陶平, 黄志强, 胡丽沙, 谢春霞. 2013. 晚古生代-中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. *地质评论*, 51(1): 1-11.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 96页.
- 韩至均, 王砚耕, 冯济舟, 陈潭钧, 罗孝桓, 刘远辉. 1999. 黔西南金矿地质与勘探[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 黄庆文, 刘苏桥, 丁龙. 2009. 我国右江盆地与美国“大盆地”卡林型金矿对比研究[J]. *矿产与地质*, 23(3): 193-203.
- 柳淮之, 钟白云, 姚明. 1986. 右江裂谷带初探[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 6(1): 9-19.
- 刘建中, 杨成富, 夏勇, 陈松, 陈发恩, 游彬, 付芝康. 2010. 贵州西南部台地相区 Sbt 研究及有关问题的思考[J]. *贵州地质*, 27(3): 178-184.
- 王砚耕. 1990. 黔西南及邻区两类赋金层序与沉积环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 6: 8-13.
- 王砚耕, 索书天, 张明发等. 1994. 黔西南构造与卡林型金矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 郑荣才, 张锦泉, 李孝全, 蒋廷操. 1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. *地质学报*, (2): 113-124.