



前沿指导

PIONEER GUIDANCE

氧气稀薄遏制了古特提斯造山带斑岩铜矿的形成？

Did Paleo-Tethyan anoxia kill arc magma fertility for porphyry copper formation?

» (GEOLOGY, July 2017)

» 罗婷¹ 周栋^{1,2} 译 (1. 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室 2. 省地质调查院项目管理处)

摘要：特提斯造山带分布了大量的斑岩型Cu-Mo-Au矿床，绝大多数矿床形成于晚中生代到新生代新特提斯洋盆俯冲时期，与古特提斯洋俯冲无关，这是由于古特提斯洋广泛的缺氧环境只能形成相对还原的岛弧岩浆，而这些岛弧岩浆不足以满足斑岩铜矿形成的氧逸度条件。已有数据显示，新特提斯与岛弧有关的岩石较古特提斯具有更高的平均Cu含量、V/Sc及Sr/Y比值，表明在新特提斯洋俯冲过程形成的岩浆具有较高的氧化程度和较大的成矿潜力。相对还原的大洋岩石圈的俯冲作用形成的岩浆，或通过岩石圈物质混染被二次还原的氧化岛弧岩浆，破坏了岛弧岩浆的成矿潜力。

引言

显生宙的岛弧岩浆富含水分且被适度氧化，反映了岩浆来自于俯冲交代变质的软流圈地幔楔，此类岩浆对于斑岩型Cu-Mo-Au矿床的形成来说是较有

利的，因为亲铜金属元素在适度氧化的岩浆中显示为不相容元素的习性，因此，金属元素在分离出岩浆热液之前已经通过岩浆被运送到了上地壳，并且在有利的成矿条件下再次沉淀聚集达到经济品位。

显生宙岛弧岩浆的适度氧

化是一个关键的成矿因素，因为岩浆中的硫主要以硫酸盐的形式存在，与此相反，在还原条件下 ($\Delta FMQ \leq 0$)，岩浆中的硫主要以硫化物形式存在，硫化物的早期饱和将会迅速耗尽岩浆中的亲铜元素与亲铁元素，导致后期岩浆热液成矿阶段岩浆不利于成矿。有学者提出前寒武纪的俯冲带和岛弧岩浆的形成处于较强的还原环境，从而解释了前寒武纪斑岩铜矿的罕见性；另一种可能是显生宙时期深海的缺氧环境导致俯冲带处于还原环境，这也限制了岩浆的成矿潜力。

二叠纪时期的古特提斯洋与全球海洋环流几乎完全隔离，这种缺氧环境下沉积了大量的富含有机质的黑色页岩（图1

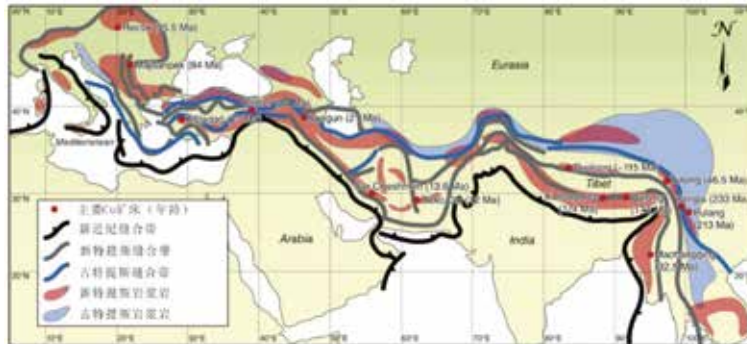


图1 古特提斯与新特提斯洋俯冲相关的岩浆岩分布图

和2)，沉积物和受热液改造但并未被氧化的大洋岩石圈的俯冲产生未被氧化的岛弧岩浆（ $\Delta FMQ \sim 0$ ），而此类岩浆形成斑岩型矿床的可能性较低。古特提斯之所以缺乏与其岛弧岩浆系统有关的且达到经济品位的斑岩铜矿是因为：①特提斯造山带中古特提斯时期岩石保存较差，埋藏浅的斑岩型矿床剥蚀严重（深度小于5km），②俯冲大洋岩石圈的还原属性导致斑岩型矿床可能根本就没有形成。

几乎没有可靠的数据支持古特提斯岛弧岩浆岩形成于氧化环境，这种岩石大多都经历了不同程度的蚀变或变质。然而，已发表的新鲜岛弧岩浆岩的数据表明：古特提斯岩浆中Cu含量较新特提斯更低，这可能是由于在还原条件下，早期硫化物饱和使得岩浆贫Cu且不足以形成斑岩型矿床。这些结果支持系统性的成矿模式，即需要多种过程的最佳、高效和连续的协作才能使金属元素浓集，从而最终形成矿床。任何步骤的低效或不达标都可能限制或破坏成矿的可能性，而俯冲带或深部岩石圈的还原环境可能

是导致岛弧岩浆不足以成矿的早期原因。

特提斯造山带的斑岩型Cu矿床

特提斯造山带对于斑岩型Cu-Mo-Au矿床及浅成热液型Au-Cu矿床有很高的成矿专属性（图1），但是，大多数已知的矿床的形成环境与新特提斯洋盆的俯冲和闭合有关，成矿时代主要为白垩纪到新生代，例如塞尔维亚的Majdanpek斑岩型Cu-Mo-Au矿床（约84Ma），伊朗中部的Sar Cheshmeh斑岩型Cu-Mo矿床（约14Ma），西藏的驱龙斑岩型Cu-Mo矿床（约16Ma）。已知的最古老的此类矿床发现于西藏以及中国西南部的印支期斑岩成矿带，包括羊拉铜矿（约233Ma），普朗铜矿（约213Ma），谢通门金铜矿（约174Ma）。前人认为这些三叠纪到侏罗纪的成矿系统与多个特提斯小洋盆在氧气充足条件下的俯冲和闭合密切相关。与此相反，特提斯造山带并没有与古特提斯洋岩石圈俯冲有关的且达到

经济品位的斑岩矿床。此类古老矿床的稀少无疑在一定程度上反映了剥蚀作用的存在，但是，分布于特提斯造山带且保存较好的晚古生代到早中生代上地壳深成岩和火山岩表明剥蚀作用并不是此类古老矿床稀少的唯一解释（图1）。

二叠纪缺氧环境下的古特提斯洋盆

古特提斯洋盆在晚石炭世到三叠纪位于赤道两侧，与全球海洋环流的隔离导致了其大范围的缺氧（图2）。从格鲁吉亚，帕米尔北部与中部以及西藏东北部的黑色页岩中发现了第一个深海缺氧的证据（图3，柱状图1-4），缺氧环境最终扩展到浅水，导致大陆架上苔藓虫类从卡匹敦阶就开始灭绝（图3，柱状图5-15）。而与此相反的是，在更广阔的泛大洋中，几乎没有证据表明存在缺氧的情况。三叠纪早期，古特提斯大洋岩石圈向北俯冲于欧亚大陆边缘之下，新特提斯洋向南打开至西米里大陆架北缘（现今的土耳其、伊朗及

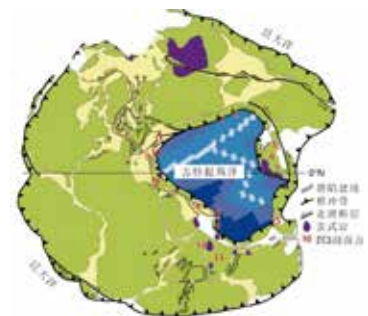


图2 二叠纪晚期古特提斯洋古地理重建（古特提斯洋与泛大洋的隔离，在缺氧环境下沉积厚层海底沉积物）

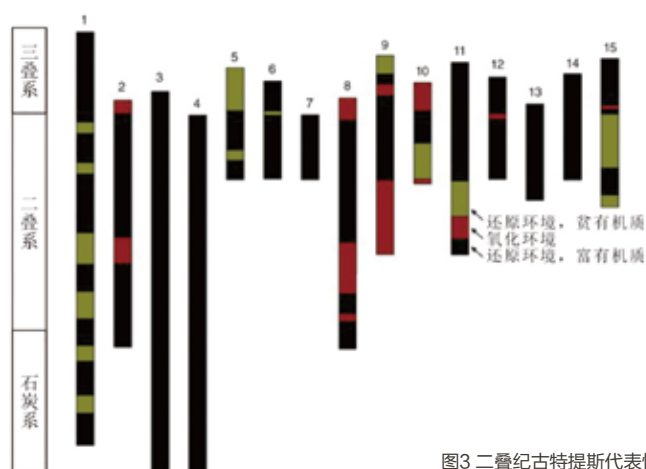


图3 二叠纪古特提斯代表性地层柱状图

西藏), 缺氧的古特提斯洋盆逐渐消失(图3), 其寿命持续到75Ma。

特提斯造山带岛弧岩浆岩

GEOROC数据库(海洋与大陆岩石地球化学<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>)包含了大量的特提斯造山带岩浆岩地球化学分析数据, 这些数据绝大部分来自于安那托利亚-伊朗造山带(特提斯造山带的一部分)的白垩纪到新生代的岩浆岩。我们收集了古特提斯洋盆俯冲、碰撞闭合所产生的早中生代岩浆岩数据, 这些岩浆岩来自于波西特山脉、大高加索山脉、伊朗中部、土库曼斯坦和西藏, 烧失量较大且不严谨的数据已被剔除。新鲜岩浆岩中金属元素的浓度是对岩浆成矿潜力最简单的评估, 常规分析得到的Cu含量及Cu-MgO的相关关系(指示岩浆分离结晶作用)显示古特提斯岩浆岩较新特提斯岩浆岩具有相对更低的铜含量, 表明新特提斯岩石具有更高的成矿潜力。岩浆氧化程度对亲

铜元素行为起重要的控制作用, 但代表岩浆氧化程度的参数难以直接测量, 且通常不被报道。有学者建议, 像V/Sc这样的微量元素比值可以用来表示岩浆氧化程度。Li and Lee (2004)报道了由亏损地幔派生的大洋中脊玄武岩(氧逸度 $\Delta FMQ \sim 0$)的V/Sc比值为6.74-1.11, 而Loucks (2013, 2014)认为与斑岩铜矿有关的适度氧化的岩浆岩V/Sc比值 >10 (SiO_2 wt%含量为58-70%)。我们选择 SiO_2 含量在58-70%范围内的样品, 发现古特提斯岩浆岩的V/Sc比率为6.1-2.2 ($n=54$), 类似于MORB(大洋中脊玄武岩), 而新特提斯岩浆岩的值为9.1-7.3 ($n=447$), 更接近Loucks (2013, 2014)提出的具有成矿潜力的氧化岩浆岩的值, 同时, 此类岩浆岩 $Sr/Y > 35$ 且($E_{un}/E_{u^*})/Y_{bn} > 2$ (SiO_2 范围58-70wt%)。这些较高的元素比值不仅与岩浆氧化程度具有对应的关系, 同时也反映岩浆富水, 岩浆中的水既可以促进角闪石结晶, 也能抑制了斜长石结晶, 富

水的岩浆有利于岩浆-热液矿床的形成。新特提斯岩浆岩 Sr/Y 平均值为29.3-23.0 ($n=633$), 高于古特提斯岩浆岩 Sr/Y 平均值24.6-18.9 ($n=121$)。

因此, 新特提斯岩浆岩具有较高的平均Cu含量、V/Sc和 Sr/Y 比值, 显示岩浆相对氧化且富水, 新特提斯岩石比古特提斯岩石具有更高的斑岩铜矿成矿潜力。

讨论与结论

由于斑岩型铜矿的形成需要相对氧化且富水的岩浆。因此, 全球斑岩型铜矿几乎只分布在显生宙的岛弧岩浆岩的事实反映了深部大洋氧化时间的推迟。即, 氧化洋壳的蚀变和俯冲带的交代发生在新元古代之后。然而, 在显生宙期间发生了大范围的深海缺氧, 古特提斯洋盆就是其中一部分。已发表的与古特提斯洋俯冲有关的岩浆岩数据表明古特提斯岩浆具有较高的还原性和较低的斑岩铜矿成矿潜力, 而新特提斯洋盆的俯冲所形成的更典型和相对氧化的环境导致大量斑岩型矿床的形成。因此, 岛弧系统成矿远景预测应该重点考虑俯冲的大洋岩石圈的氧化程度: 海底还原性物质长时间发生俯冲作用的区域内不太可能产生出具有成矿潜力的岛弧岩浆系统。或者氧化的岛弧岩浆在上升过程中被二次还原, 引发早期的硫化物饱和及深部地壳的亲铜元素损失, 也会导致岩浆贫瘠以至于大大降低斑岩铜矿成矿潜力。