

湖南板溪锑矿床深部金矿化新发现及其意义

梁兰庆^{1*}, 冯经平^{2#}, 韦龙明^{1#}, 谢 懿²

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²湖南省自然资源调查所, 湖南 娄底

收稿日期: 2025年2月27日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

板溪锑矿床位于湖南省桃江县, 是湘中地区有名的锑矿床之一。近年来, 通过地质调查和矿床勘探工作, 在矿区深部发现了金矿化迹象, 为该矿床的深部成矿远景预测提供了新的线索。在矿床地质特征、锑金矿化特征的系统分析基础上, 结合地球化学方法, 发现了板溪锑矿床Au与Sb无明显的负相关关系, 与Au相关性最为密切的元素是As、Mo、Co, 2号脉带伴有金矿化的富集。显微研究及电子探针分析, 发现金主要以包裹金的形式存在于黄铁矿和毒砂中。通过对矿床的构造叠加晕方法研究, 预测板溪锑矿床金矿化的深部2-3、2-2号脉南西侧可能存在更大规模和更高品位的锑金矿体, 深部具有良好的找金潜力。经工程验证, 在板溪锑矿区-800 m深部打到锑金工业矿体, 这些研究成果为板溪锑矿床的后续矿床勘探和开发提供了重要的理论和实践依据。

关键词

板溪锑矿床, 金矿化, 成矿远景预测, 构造叠加晕

New Findings and Meaning of Gold Mineralization in the Deep of the Banxi Antimony Deposit in Hunan Province

Lanqing Liang^{1*}, Jingping Feng^{2#}, Longming Wei^{1#}, Yi Xie²

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Institute of Natural Resources Survey of Hunan Province, Loudi Hunan

Received: Feb. 27th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 梁兰庆, 冯经平, 韦龙明, 谢懿. 湖南板溪锑矿床深部金矿化新发现及其意义[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 402-415. DOI: 10.12677/ag.2025.154041

Abstract

The Banxi antimony deposit is located in Taojiang County, Hunan Province, and is one of the well-known antimony deposits in the central region of Hunan. In the recent geological surveys and exploration of the deposit, signs of gold mineralization have been discovered in the deep part of the ore deposit, providing new clues for the deep ore-forming prospects of the deposit. Based on a systematic analysis of the geological and antimony-gold mineralization characteristics of the deposit, combined with geochemical methods, it has been found that there is no significant negative correlation between Au and Sb in the Banxi antimony deposit, and the elements most closely related to Au are As, Mo, and Co, with the enrichment of gold mineralization in vein zone 2. Microscopic studies and electron probe analysis have shown that gold mainly exists in the form of inclusion in pyrite and arsenopyrite. Through the study of the superimposed alteration halo of the deposit, it is predicted that there may be larger-scale and higher-grade gold-antimony ore bodies on the southwest side of veins 2-3 and 2-2 in the deep part of the Banxi antimony deposit, with good potential for gold exploration in the deep part. Through engineering verification, it has been discovered that the Banxi antimony deposit has an industrial ore body of antimony and gold at a depth of ~800 meters, providing an important theoretical and practical basis for the subsequent exploration and development of the deposit.

Keywords

Banxi Antimony Deposit, Gold Mineralization, Ore-Forming Prospect Forecasting, Superimposed Alteration Halo

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湘中地区是我国最重要的锑金矿生产基地和资源基地,板溪锑矿床是本区内一中型石英脉型锑矿床,具有悠久的开采历史。经百多年开采[1]-[3],所剩下储量已经不多,矿山面临接替资源的危机,急需寻找新的资源供矿山开采。该矿山前人做了大量的地质工作,解放前就有前辈地质学家做过地质调查,解放后湖南冶金 237 队¹、湖南省地勘局和湖南省区测队更是做了详细的地质勘探工作。

胡楚南[4]也提到板溪锑矿的金属矿物以辉锑矿为主,伴生毒砂、黄铁矿和微量自然金、黄铜矿,伴生元素含 As0.58%, Au0.28%。

罗献林[1]将板溪矿床的矿石类型划分为三类:辉锑石英脉型(V2),锑品位富(大于 16%)而稳定;含锑破碎带网脉型(V1-1),锑品位低,变化大;含锑金石英脉型(V4-1, V4-2),常呈矿巢,伴生有金。

陈强壮[5]提出,矿区产出的主要矿种有辉锑矿和金矿,同时伴生有黄铜矿、黄铁矿、毒砂矿、铅锌矿等矿物成分。矿区内金矿主要分布于矿区小港矿段及 2 号锑矿脉深部,局部含量富集金含量超过边界品位 0.5×10^{-6} ,达到工业要求。

根据付胜云[6]的研究,板溪锑矿区的板溪群五强溪组有益组分含量 Sb10.94%, Au0.56 g/t,板溪式碎屑岩中热液型锑金矿的重砂矿物含有自然金,锑矿石的特征矿物为自然金、毒砂、黄铁矿。

¹ 湖南冶金 237 队,湖南省桃江县板溪矿区评价报告,1980。

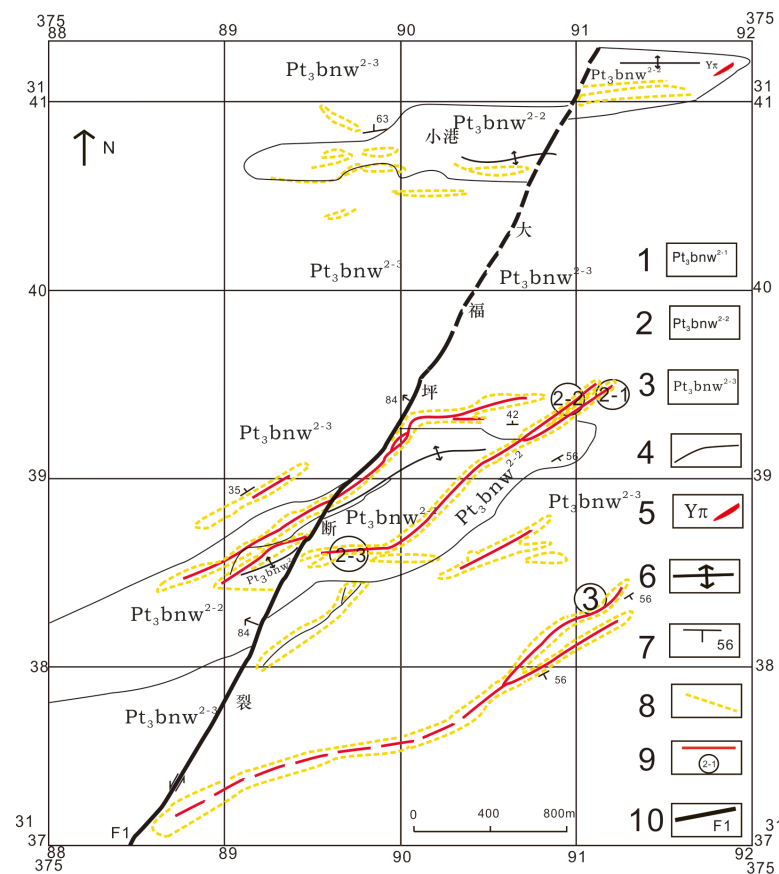
于春胜[7]提到,中南大学地质研究所也认为矿区东西向构造的金矿化潜力大于锑矿化,特别是小港地区。对12号脉采三件样分析,Au品位分析高达6.27 g/t,5.43 g/t,2.7 g/t。

众多学者[4]-[6]和有色地质勘查局在板溪锑矿区开展了科研和勘探工作,对板溪锑矿床的地质特征、形成条件、控矿因素、找矿标志与地球化学找矿方法进行了诸多研究,板溪锑矿区除辉锑矿为主要矿种之外,存在金、锑共生现象,其中北北东向矿脉以含锑为主,东西向矿脉含金较高,伴生锑,如矿区西北部的小港矿段东西向矿脉及2号锑矿脉深部中金含量较高,局部金含量超过工业品位[5][8]。

原生晕是指在矿体周围形成的地球化学异常晕,是寻找金属矿床最有效的方法之一[1][9],它可以提供有关矿体成因、成矿过程和深部成矿潜力的重要信息,从20世纪50年代到现在,原生晕找矿方法已发展成为地球化学找矿的最主要方法之一,特别是在危机金矿山预测盲矿上的应用。

本文在通过对湖南板溪锑矿床地质特征简要介绍的基础上,对矿区金矿化的最新发现进行阐述,并探讨其地质与找矿意义,最后通过原生晕的研究分析,探讨锑矿与金矿的成矿作用关系,并预测矿床的深部成矿潜力,实现板溪矿山资源的可持续综合利用。

2. 矿区地质特征概况



1. The first subsection of the upper section of the Wuqiangxi Formation of the Banxi Group 2. The second subsection 3. Third subsection 4. Geological boundaries 5. Quartz porphyry veins 6. Backslope 7. Stratigraphic production 8. Alteration zones 9. Veins and their numbering 10. Faults.
1. 板溪群五强溪组上段第一亚段 2. 第二亚段 3. 第三亚段 4. 地质界线 5. 石英斑岩脉 6. 背斜 7. 地层产状 8. 蚀变带 9. 矿脉及其编号 10. 断层。

Figure 1. Geological sketch map of the Banxi mining area
图 1. 板溪矿区地质简图

(1) 矿区地层。矿区出露地层为新元古界板溪群五强溪组上段(图 1)，由一套具滨海—浅海相复理式沉积建造特征的区域浅变质碎屑岩系组成。按岩性组合分为三个亚段，其中第一、第二亚段为主要赋矿地层。主要岩性为灰至灰绿色凝灰质板岩、绢云母板岩、砂质板岩、变沉凝灰岩等[7]。

(2) 矿区构造。板溪锑矿位于雪峰弧形构造带北东段，安化—浏阳东西向构造带西段及次级天树山背斜东倾伏端与北北东向桃江—城步断裂带的复合部位。矿区构造类型有两组，即 EW 向构造与 NNE 向构造，EW 向构造是矿区的基本构造骨架，形成时间比较早，属于成矿前或成矿期构造；而 NNE 向构造改造、复合、斜接 EW 向构造，形成时间较晚，表现为成矿期或成矿后构造[1]。

(3) 变质作用。区内的浅变质作用形成板岩、凝灰质板岩、变沉凝灰岩及变质长石石英砂岩等。围岩蚀变多沿断裂及旁侧碎裂化岩石进行，蚀变带宽 0.80~100 m。蚀变种类有毒砂化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化等，具分带特征。

(4) 围岩蚀变。矿区内发育褪色化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化等围岩蚀变，它们与金锑矿化关系密切。

3. 板溪锑矿化特征

3.1. 矿脉(体)特征

锑矿脉分布在背斜部位，严格受断裂控制。区内已发现大小矿脉 8 条，以 2 号矿脉带规模最大，矿化最好，也是矿山目前开采的主要矿脉。2 号矿脉带地表走向长约 2000 m。2 号脉带由 3 条矿脉组成(参见图 1)，在北东侧有两条平行矿脉，南东与北西分别为 2-1 号脉、2-2 号脉，往南西侧合并为一条矿脉，称为 2-3 号脉(图 2)，整体呈左形交替展布，3 条矿脉在走向和倾斜延深均有交替、重叠、分支、复合。2 号脉带各矿脉走向 45°~80°，倾向北西，倾角 48°~89°，局部往南东反倾。2 号矿脉带主要受北东向断裂构造控制，赋存在破碎带中，往南西方向收敛归并于 F1 的下盘(即 2-3 号脉)。破碎带两侧有较强的褪色蚀变，矿脉与旁侧蚀变围岩总体呈现出蚀变带→含矿破碎带→富矿脉→含矿破碎带→蚀变带的对称分带现象(图 2)。

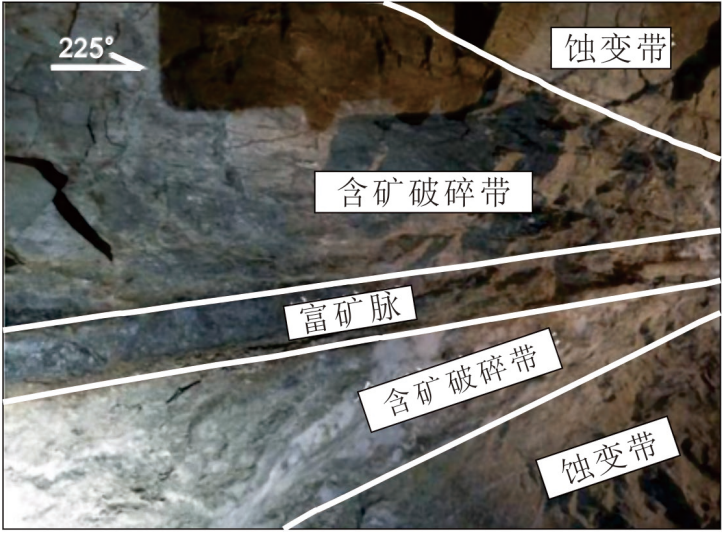


Figure 2. Veins 2-3 at the top of the 16-line refuge in the middle 595 m
图 2. 595 m 中段 16 线硐顶 2-3 号脉

2 号矿脉带共控制矿体 19 个，沿矿脉走向均以西段矿体规模最大，矿体长 280~522 m，倾斜延深

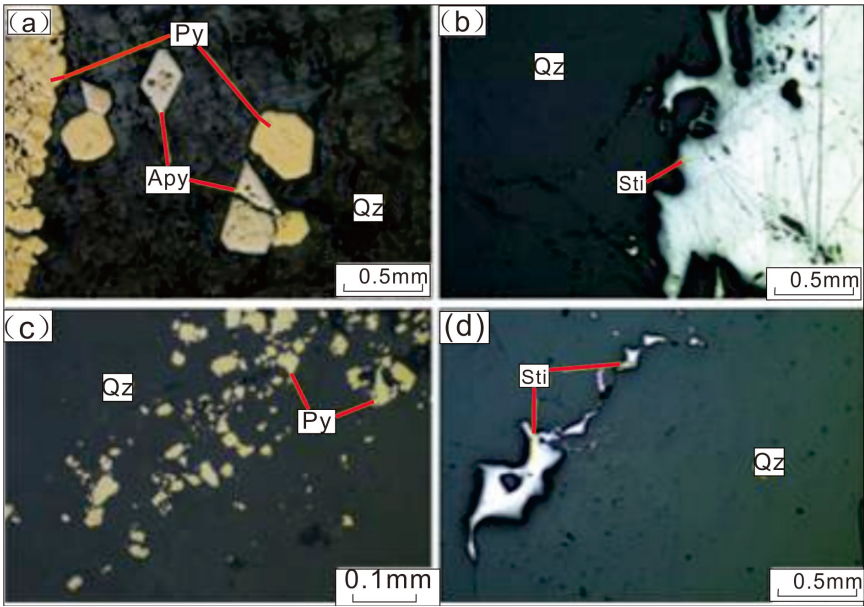
283~645 m, 矿体厚 0.02~2.35 m, 锑品位 $1.81\sim67.20\times10^{-2}$ 。其中, 2-1 矿脉为盲矿脉, 出露在 80 m 标高以下, 矿脉呈舒缓波状延伸, 由相互平行的 4 个脉体组成。平面上成较紧闭的“多”字型分布, 纵剖面上整体呈扁豆状。2-2 矿脉为 2-3 脉的上盘分支脉, 矿化较连续, 大部分为富矿。2-3 矿脉矿化连续, 多为富矿, 在倾向上中间厚, 两头薄。三条矿脉规模特征对比见表 1, 走向上矿脉分支复合处脉体厚度变大, 其中 2-3 矿脉与 2-2 矿脉复合处最厚为 2.35 m, 2-3 矿脉与 2-1 矿脉复合处厚度也有 1.72 m。矿体在平面上呈梭状或长条状右行雁列展布, 首尾重叠或基本相连; 在垂向上呈不规则长方形右行排列, 均具有东高西低, 向南西侧伏的规律。

Table 1. Comparison of the size characteristics of the three veins [4]
表 1. 三条矿脉规模特征对比表[4]

矿脉编号	脉幅	平均厚度	变化系数	锑品位	平均品位	变化系数
2-1 矿脉	0.03~1.15 m	0.24m	73%	0.30%~65.30%	26.39%	65%
2-2 矿脉	0.03~1.10 m	0.25m	102%	0.16%~55.49%	18.68%	70%
2-3 矿脉	0.02~2.35 m	0.45m	97%	0.6%~64.22%	25.80%	63%

3.2. 矿石特征

矿石矿物组成: 矿石的矿物成分比较简单, 金属矿物以辉锑矿为主, 伴生有毒砂、黄铁矿(图 3)和微量自然金、黄铜矿、闪锌矿等; 脉石矿物以石英为主, 其次为绿泥石、白云石、方解石、绢云母及微量磷灰石、长石等。



Qz: quartz, Py: pyrite, Apy: poisonous sand, Sti: pyroxene.
Qz: 石英, Py: 黄铁矿, Apy: 毒砂, Sti: 辉锑矿。

Figure 3. Ore minerals in the No. 2 vein zone of the Banxi Antimony Mine (orthogonal polarized light)
图 3. 板溪锑矿 2 号脉带中矿石矿物(正交偏光)

矿石结构构造: 矿石的结构有花岗变晶结构、自形粒状结构、他形粒状结构及压碎结构等。矿石构造有脉状构造、致密块状构造、浸染状构造、角砾状构造。以块状构造为主, 浸染状构造次之。

矿石的自然类型为原生矿石。矿石类型按主要矿物组合分为：石英－辉锑矿矿石；黄铁矿－石英－辉锑矿矿石、毒砂－黄铁矿－石英－辉锑矿矿石、碳酸盐－石英－辉锑矿矿石；按矿石构造分为块状矿石、浸染状矿石、混合型矿石、角砾状矿石。

4. 板溪锑矿金矿化

4.1. 金矿化研究新进展

(1) 深部找矿新发现

如下所述，根据我们开展的构造叠加晕找矿方法预测结果，由湖南有色二总队勘查所对 2-3 号脉实施坑内钻探验证，其中，KZK1203、KZK1204 两个钻孔于 12 线-800 m 左右均控制到 2-3 号矿脉，打到较好的工业矿体，其中，锑品位 1.31%~44.16%，锑矿脉中金品位 0.12g/t~1.37g/t，与我们开展的构造叠加晕预测结果一致。勘探生产资料显示，2 号脉带深部(-480 m 以下)普遍发育金矿化，金品位 0.15 g/t~2.82 g/t，平均 0.56 g/t。

(2) 金的赋存状态

根据电子探针结果(表 2)，我们可以得出以下结论：(a) 黄铁矿和毒砂是板溪矿床中含金矿物的两个主要载体，它们以包裹金的形式存在，并且含量较高；(b) 在辉锑矿中仅有微量的金或不含金。这表明辉锑矿并不是板溪矿床中的主要金矿载体。因此，板溪矿床中的金主要存在于黄铁矿和毒砂中，并且以包裹金的形式存在。

Table 2. Main analysis results of electron microprobe for main metallic minerals in Banxi deposit

表 2. 板溪矿床主要金属矿物电子探针主要分析结果表(%)

测点	As	Al	S	Zn	Sb	Au	Ag	Fe	Cu	Ni	总量
B2-Snt03	0.20	0.00	27.12	0.00	70.39	0.00	0.00	0.12	0.00	0.09	97.92
B2-Snt04	0.16	0.00	28.15	0.16	71.22	0.00	0.03	0.12	0.01	0.00	99.85
B8-Snt03	0.16	0.05	27.61	0.00	71.05	0.00	0.00	0.67	0.01	0.01	99.54
B8-Snt04	0.13	0.01	28.86	0.00	71.75	0.06	0.00	0.01	0.01	0.02	100.84
B14-Snt01	0.18	0.01	28.39	0.25	72.19	0.06	0.00	0.15	0.01	0.00	101.23
B14-Snt02	0.09	0.00	29.64	0.26	57.17	0.34	0.00	12.78	0.01	0.00	100.29
B17-Snt01	0.12	0.00	28.12	0.00	71.39	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	99.71
B17-Snt05	0.19	0.00	28.27	0.46	71.75	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	100.67
B2-py06	0.51	0.01	53.78	0.27	0.00	1.10	0.00	44.11	0.04	0.83	100.65
B8-py05	0.26	0.00	54.49	0.00	0.00	1.76	0.01	44.97	0.00	0.00	101.49
B14-py04	0.06	1.49	49.69	0.00	0.00	1.06	0.00	44.05	0.00	0.01	96.36
B14-py05	0.38	0.00	52.36	0.04	0.00	1.12	0.00	44.62	0.01	0.11	98.63
B17-py06	0.73	0.00	53.08	0.00	0.00	1.22	0.03	44.69	0.00	0.03	99.78
B17-py07	0.47	0.00	54.04	0.00	0.00	1.23	0.00	44.24	0.00	0.02	100.01
B18-py01	1.14	0.28	47.91	0.00	0.00	1.75	0.04	41.86	0.01	0.01	93.01
B18-py02	0.74	0.01	52.20	0.00	0.00	1.25	0.02	44.17	0.00	0.03	98.41
B18-py05	1.13	0.01	52.31	0.00	0.00	1.29	0.01	44.27	0.02	0.09	99.13
B18-py06	1.26	0.00	51.79	0.00	0.00	1.20	0.00	43.93	0.00	0.00	98.17

续表

B2-Apy01	44.47	0.00	20.82	0.00	0.00	1.34	0.04	34.14	0.00	0.05	100.86
B2-Apy02	43.56	0.00	20.65	0.08	0.00	1.26	0.00	34.00	0.00	0.11	99.66
B8-Apy01	43.38	0.00	20.37	0.01	0.69	1.30	0.00	34.07	0.00	0.00	99.81
B8-Apy02	44.66	0.01	20.12	0.10	0.00	1.40	0.00	34.21	0.00	0.00	100.49
B14-Apy03	43.28	0.00	20.12	0.09	0.00	1.25	0.06	34.16	0.00	0.00	98.96
B14-Apy06	42.90	0.00	21.60	0.00	0.00	1.23	0.01	34.53	0.00	0.04	100.32
B17-Apy02	43.34	0.01	21.50	0.00	0.00	1.19	0.00	34.35	0.00	0.04	100.44
B17-Apy03	43.89	0.00	20.65	0.00	0.00	1.26	0.00	34.37	0.00	0.06	100.23
B17-Apy04	44.20	0.00	20.48	0.05	0.00	1.16	0.00	33.88	0.00	0.00	99.77
B18-Apy03	43.12	0.00	21.29	0.00	0.00	1.43	0.02	34.35	0.00	0.00	100.21
B18-Apy04	43.30	0.00	21.29	0.12	0.00	1.29	0.04	34.40	0.02	0.04	100.50

Note: Snt is Stibnite, Py is pyrite, Apy is arsenopyrite.

注：Snt 为辉锑矿，Py 为黄铁矿，Apy 为毒砂。

通过统计(表 3)得出以下信息，辉锑矿主要成分是 Sb 和 S，平均值为 69.61%和 28.27%，矿石中 Au 的含量很低，甚至不含金，极不稳定；黄铁矿主要成分为 S 和 Fe，元素含量平均值分别为 54.49%和 44.09%，Au 元素含量仅次于 Sb 和 S，且稳定；毒砂主要成分为 As、Fe 和 S，元素含量平均值分别为 43.64%、34.22%和 20.81%，Au 元素含量仅次于 As、Fe 和 S，且稳定。

Table 3. Statistical table of electron microprobe analysis of major metallic minerals in the Banxi deposit (%)

表 3. 板溪矿床主要金属矿物电子探针分析统计表(%)

矿物名	统计	As	Al	S	Zn	Sb	Au	Ag	Fe	Cu	Ni	总量
辉锑矿 (8)	最小值	0.09	0	27.12	0	57.17	0	0	0	0	0	97.92
	最大值	0.2	0.05	29.64	0.16	72.19	0.34	0.03	12.78	0.03	0.09	100.84
	平均值	0.15	0.01	28.27	0.14	69.61	0.06	0	1.73	0.01	0.02	100
黄铁矿 (10)	最小值	0.06	0	47.91	0	0	1.06	0	41.86	0	0	93.01
	最大值	1.26	1.49	54.49	0.27	0	1.76	0.04	44.97	0.04	0.83	101.49
	平均值	0.67	0.18	52.17	0.03	0	1.3	0.01	44.09	0	0.11	98.56
毒砂 (11)	最小值	42.9	0	20.12	0	0	1.16	0	33.88	0	0	98.96
	最大值	44.66	0.01	21.6	0.12	0.69	1.43	0.06	34.53	0.02	0.11	100.86
	平均值	43.64	0	20.81	0.04	0.06	1.28	0.02	34.22	0	0.03	100.11

综上所述：板溪锑矿床主要矿物中黄铁矿和毒砂为主要的载金矿物，Au 含量较高且以包裹金的形式稳定存在于黄铁矿和毒砂中；辉锑矿中 Au 元素含量较低甚至不含金。

(3) 成矿阶段及矿物生成顺序

根据矿石结构构造、矿物共生组合关系，可以将板溪锑矿床热液成矿期划分为四个成矿作用阶段(图 4)。金矿化主要发生在第二个成矿作用阶段(即毒砂 - 黄铁矿 - 石英阶段)。矿物生成的大致顺序是石英 - 毒砂 - 黄铁矿 - 辉锑矿。因此，金矿化比锑矿化形成时间早。

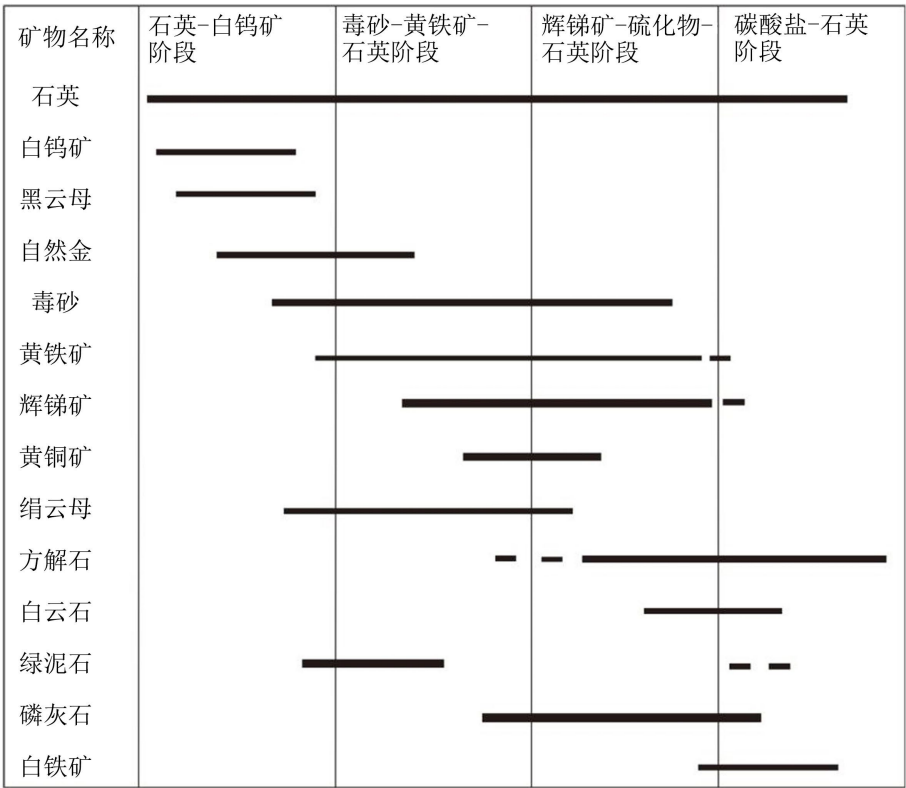


Figure 4. Mineral production sequence of antimony mineralization process
图 4. 锑矿化过程矿物生成顺序

(4) 矿化富集规律

- (a) 北东东向矿脉以含锑为主、伴生金，东西向矿脉以含金为主，共生锑。总体而言，东西向脉组矿化较差，而北东东向脉组矿化较强。
- (b) F1 上升盘(下盘)近背斜轴部矿化好，而 F1 下降盘(上盘)或远离背斜轴部矿化差。
- (c) 断裂面较平直、羽状裂隙发育、两组裂隙相交等部位以及有断层泥出现的地段，矿化一般较为富集。
- (d) 矿脉围岩为凝灰质板岩、变沉凝灰岩，且有夹层时，一般矿化较好、品位较富；当矿脉进入纯板岩时，往往形成较紧闭的构造带(片理化带)或仅存在构造面，矿化虽较强，但厚度变薄。
- (e) 2 号脉带矿体倾斜延深是走向延长的 1~1.5 倍，矿体整体往南西侧伏，矿化富集中心往南西方向呈侧列式排列。

4.2. 控矿因素分析

- (1) 构造因素：板溪金锑矿床，位于北北东向桃江 - 城步断裂与北西向常德 - 安仁断裂的交汇处，呈入字型，在两组断裂的交汇部位对成矿最为有利；该矿床属中低温热液充填型锑矿床，断层构造是本矿区主要的控矿因素，矿化蚀变带总体上沿北北西的矿带分布。
- (2) 地层岩性因素：据新元古界出露地层的微量元素分析结果统计(表 4)表明，这些地层中 Au、Sb、As、Hg、W、Pb、Zn、Cr、Cn 等元素与上部大陆地壳丰度相比相对富集，特别是 Au、As、Sb、W 的平均含量明显高于上部大陆地壳的平均值，构成一个典型的 Au-As-Sb-W 含矿建造，可以为金锑矿的形成提供必要的物质来源，被诸多专家学者视为区内金锑矿的“矿源层”。由于五强溪组的碎屑岩孔隙率高，

构造裂隙发育，有利于地下水循环，是区内金锑矿的“储矿层”。而五强溪组的凝灰质板岩和板岩则由于孔隙度差，透水性不好，起到很好的屏蔽作用，板岩可以作为很好的成矿屏蔽界面，相当于盖层。

Table 4. Mean trace element contents of Neoproterozoic strata (10^{-6} , *in 10^{-9})

表 4. 新元古界地层微量元素平均含量(10^{-6} 、*者单位 10^{-9})

地层	Au*	Sb	As	Hg*	W	Pb	Zn	Cu	Ag*	Sn	Ni	Cr	Cn	Sr	V	Ba
五强溪组(20)	2.4	1.7	4.5	43	3.2	24.9	102.7	20	7.8	2.9	9.6	67.5	12.8	100	60.3	859.2
马底驿组(10)	3.4	2.1	2.3	47	5.2	25.6	137.1	33	5	3.5	25.5	159.2	22.3	45.9	119.8	441.8
冷家溪群(7)	3.6	2.4	9.5	52	4.5	36.9	156.5	57.5	5	4.2	27.7	173.9	21.7	27.6	145.5	409.6
上地壳⑤	1.8	0.2	1.5	80	2	20	71	25	5	5.5	20	35	10	350	60	550

注：⑤Taylor and Mc Clennan，1985；括号内为样品个数。

(3) 岩浆岩因素：研究表明，花岗斑岩脉、石英斑岩脉的成矿物质很可能直接来自地壳深部的富金锑残余岩浆[10]。岩浆岩提供的热源，诱发并促进矿源层中成矿元素活化迁移，岩浆流体与变质流体、大气水的混合是成矿元素卸载主因[11][12]。所以，岩浆活动既能为矿床供热液与热源，促使地层中矿化元素活化转移、重新聚集，对成矿有积极意义，岩脉也可作为成矿溶液及金矿质补充通道。

元古代海底火山喷发，地壳深部锑(金)矿质随火山碎屑沉积海底，形成“矿源层”。后期多次构造活动，尤其印支晚期造山伴随岩浆活动，在岩浆加热下，锑、金、砷、硫等成矿元素从基底地层浸出，形成初始富硅碱性含矿流体。深源高温岩浆流体与低温大气流体混合，在地壳较高位置，因应力释放、温度降低，这些成矿元素沉淀到有利构造空间和岩性部位，形成板溪锑(金)矿床。

(4) 围岩蚀变因素 矿区内褪色化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化等围岩蚀变同时出现时，锑(金)矿化也相对富集，特别是金矿化与黄铁矿化、毒砂化关系密切，近于正相关关系。而当出现大量的绿泥石化或碳酸盐化时，则矿化较差。在相同的构造-岩性条件下，其蚀变带的宽度和蚀变强度与矿脉的厚度和矿化强度几乎是正比关系：一般情况下，褪色化蚀变宽度大，蚀变强烈的地段，金锑矿化较好，而弱蚀变带，一般矿化较弱。在叠加蚀变带发育地段，或者说当出现有黄铁矿化、硅化、毒砂化与绢云母化叠加时，即预示有金锑矿的富集。

5. 找矿标志与成矿预测

5.1. 找矿标志

找矿标志，是现今在地壳中直接或间接显示出来的反映矿床存在或可能有矿床存在的各种宏观或微观的信息和线索。根据研究区内锑金矿床的地质、地球化学特征、控矿地质因素和矿床成因及成矿规律等综合分析，总结提出如下几点找矿标志：

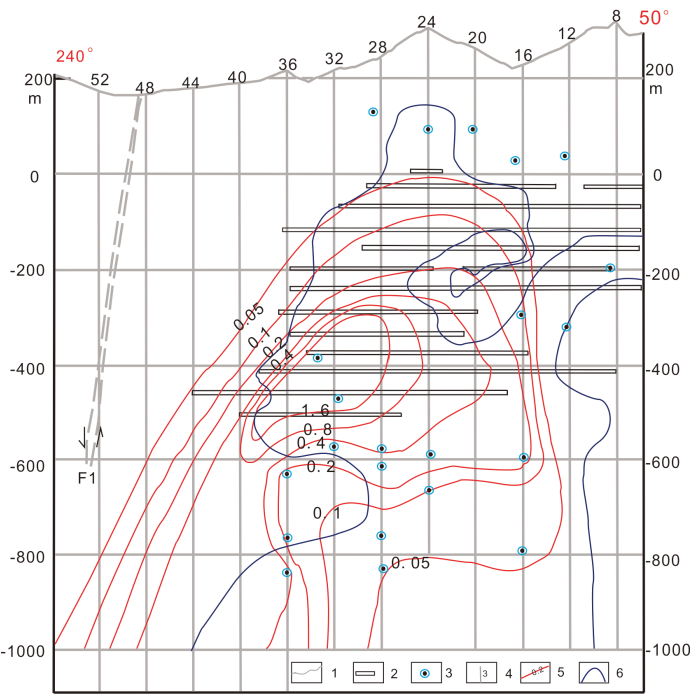
(1) 地层标志：板溪矿区赋矿地层为板溪群五强溪组上段第一、第二亚段，赋矿围岩是成矿的主要矿源层，并且有特定的层位岩性控矿，区内灰至灰绿色凝灰质板岩、绢云母板岩、砂质板岩、变沉凝灰岩，为区内金锑矿找矿的地层岩性标志。

(2) 构造标志：锑、金矿化受韧性剪切带和区域断裂的联合控制，矿床受次级构造控制。因此，脆-韧性剪切带内不同构造叠加部位是金锑矿找矿的主要构造标志。另外，板溪矿区为石英脉型金锑矿床，石英脉体严格受构造控制，因此石英脉是找矿构造标志的直接体现。在构造发育的隆起带中，有区域性主干断裂及其旁侧的低等级、低序次断裂与层间破碎带或节理裂隙，是寻找脉状充填型锑矿床的重要构造标志。

- (3) 岩浆岩标志：本区锑、金矿化主要与隐伏岩体及其周围基性、酸性岩脉关系较密切。因此，基性、酸性岩脉是找矿的重要标志，这些岩脉的外接触带也是寻找金锑矿的有利地段。
- (4) 围岩蚀变标志：本区金锑矿围岩蚀变主要有褪色化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化等。一般蚀变带宽大，蚀变强烈部位和硅化与其他(黄铁矿化、褪色化)蚀变叠加部位，往往具有富矿体存在。
- (5) 矿物学标志：本区金锑矿形成大致可分为石英 - 白钨矿阶段，毒砂 - 黄铁矿 - 石英阶段，辉锑矿 - 硫化物 - 石英阶段，碳酸盐 - 石英阶段。
- 而第二，第三阶段金锑矿的主要成矿阶段，出现以黄铁矿、毒砂为主的多金属硫化物组合。因此黄铁矿、毒砂等硫化物组合是寻找金锑矿富矿的矿物学标志。
- (6) 化探异常标志：与金锑相关的元素有 S、As、Hg、Pb、W、Zn、Cr、Ag 等，不同的元素组合，指示不同成因类型的金矿，板溪矿区主要的地球化学找矿元素组合形式为 Au、As、Sb、Hg、W 元素。Au、As、Sb、Hg、W 等元素的组合异常及金重砂异常是找金锑的间接标志。
- (7) 其他标志：如原生矿化露头、采矿窿道、老窿、废矿堆(碴)、矿石转石等，均可作为寻找金锑矿的直接找矿标志。

5.2. 成矿地质条件分析

板溪锑矿区主要的赋矿地层是板溪群五强溪组上段凝灰质板岩、砂质板岩，北东向次级断裂为主要的容矿构造。矿床受区域性断裂及背斜的复合控制，矿体倾向延伸是走向延长的 1~1.5 倍。2 号脉带具南西侧伏规律，且普遍具有金矿化，金品位 0.15~2.82 g/t，平均 0.56 g/t。2 号脉带金矿化富集中心也具有往南西侧伏或侧列的规律(图 5、图 6)，显示往深部靠近大福坪断裂(F1)的方向具良好的找金潜力。

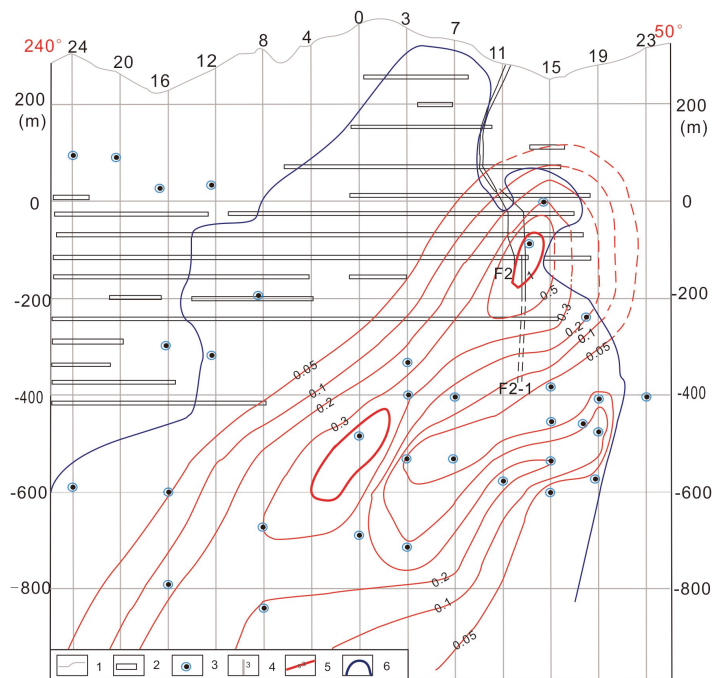


1, Topographic lines 2, Pits and locations 3, Drill holes and locations 4, Exploration lines and numbers 5, Contours and values 6, Vein boundaries.

1、地形线 2、坑道及位置 3、钻孔及位置 4、勘探线及编号 5、等值线及数值 6、矿脉边界。

Figure 5. Contour map of gold thickness (m) × grade (g/t) of No.2-3 veins in Banxi Mine Area

图 5. 板溪矿区 2-3 号脉金厚度(m) × 品位(g/t)等值线图



1, Topographic lines 2, Pits and locations 3, Drill holes and locations 4, Exploration lines and numbers 5, Contours and values 6, Vein boundaries.
1、地形线 2、坑道及位置 3、钻孔及位置 4、勘探线及编号 5、等值线及数值 6、矿脉边界。

Figure 6. Contour map of gold thickness (m) × grade (g/t) of No.2-2 vein in Banxi Mine Area
图 6. 板溪矿区 2-2 号脉金厚度(m) × 品位(g/t)等值线图

5.3. 成矿元素相关分析

本次研究从板溪矿区-240 m 中段至-595 m 中段分别于 28 线、12 线、7 线、15 线采集了 2-3 号脉、2-2 号脉、2-1 号脉的矿脉样品分析 Au、As、Sb、Hg、Ag、Mo、W、Cu、Pb、Zn、Bi、Sn、Co、Ni、V、Ti、Mn、Sr、Ba、Li、F 等 21 种跟成矿有关的微量元素。

微量元素分析结果统计(表 5)显示, Au 与 Sb 无明显的正负相关关系, 有点“若即若离”; Au 与 As 有明显的正相关关系, 推测 Au、As 存在共生关系; Au 矿化富集规律与深度有关, 在特定深度极差较小(-455 m, -505 m), 极差较大(-330 m, -375 m), 不同深度 Au 元素含量差异较大, 总体上, 越往深部, 差异稳定性有变好的趋势。

通过微量元素 R 型聚类分析显示(图 7), 与 Au 相关性最为密切的元素是 As、Mo、Co。Au、As、Mo、Co 为一个元素组合, Sb、Ni、Hg、Cu、Ag、Pb、Zn、W 为一个元素组合, 反映出多金属的矿化阶段, 说明 Au 与 Sb 的成矿就位时间稍有差别。Sb 与 Ni 的关系极为密切, 说明区内出露的基性岩脉可能与成矿有密切关系。

5.4. 构造叠加晕分析

根据板溪矿区-330 m 中段至-595 m 中段的 12 线、28 线、7 线、15 线等地所采集的原生晕样品分析结果, 通过计算, 得出以下预测:

2-3 号脉 12 线, -415 m 中段为后尾晕(Co, Mn)+近矿晕(Au), -505 中段尾晕(V, Ti)+前缘晕(Hg, F, Ba); -550 m 中段主要近矿晕(Cu, Pb); -595 m 中段主要近矿晕(Ag, Zn)+前缘晕(As, Sb), 预示着矿体在-595 m 以下深部可能还有较大延伸。

Table 5. Statistics of trace element analysis results of the No. 2 vein zone of the Banxi mine (the content unit is the same as Table 5)
表 5. 板溪矿区 2 号脉带微量元素分析结果统计表

中段	件	统计	Au	As	Sb	Hg	Ag	Mo	W	Cu	Pb	Zn	Bi	Sn	Co	Ni	V	Ti	Mn	Sr	Ba	Li	F
-245 m	1	均值	1395.0	17150.0	0.03	98.90	0.08	32.9	56.90	14.90	6.40	20.40	0.21	13.1	14.0	20.90	49.10	2682.00	658.00	223.00	277.00	7.33	327.00
		最小	7.04	25.16	0.07	69.30	0.04	0.32	20.20	9.40	4.70	54.70	0.26	4.00	9.80	9.30	63.50	3531.00	551.00	137.00	746.00	20.68	635.00
		最大	405.00	8021.00	34.28	448.40	0.19	0.90	64.00	25.70	121.0	961.00	0.21	4.10	10.3	93.70	42.50	2460.00	81.00	17.90	170.00	2.51	337.00
-330 m	3	均值	172.01	2993.72	11.94	203.27	0.11	0.69	53.70	30.13	43.87	351.43	0.23	4.37	10.6	40.60	57.37	3113.00	394.00	96.97	623.33	10.84	589.00
		最小	98.90	5368.00	25.12	141.50	0.46	0.57	55.30	57.50	36.40	122.00	0.21	3.90	7.40	44.40	43.30	2629.00	231.00	106.00	184.00	7.03	345.00
		最大	370.00	5328.00	12.34	95.40	0.13	0.78	66.90	38.20	5.40	125.00	0.21	8.40	6.80	25.90	42.60	2304.00	314.00	128.00	70.80	4.15	278.00
-375 m	3	均值	246.30	6087.33	24.12	112.67	0.41	0.58	49.27	53.47	37.80	105.37	0.21	7.13	7.00	42.70	45.20	2510.67	304.00	112.00	112.30	5.24	290.33
		最小	270.00	4144.00	5.90	214.00	0.09	0.92	94.70	23.10	6.10	401.00	0.21	4.00	9.20	19.80	39.50	2138.00	483.00	189.00	63.50	3.50	174.00
		最大	825.00	5046.00	1.83	90.80	0.07	4.58	67.50	19.90	5.80	27.30	0.21	3.30	13.6	24.80	52.40	2941.00	361.00	158.00	276.00	28.77	324.00
-415 m	4	均值	450.00	5496.50	12.83	126.15	0.17	2.91	55.88	31.48	34.45	149.83	0.21	4.43	10.9	35.88	49.28	2703.75	317.00	114.85	342.88	9.78	364.00
		最小	255.00	6427.00	22.83	198.80	0.59	0.52	48.10	39.00	34.10	368.00	0.21	5.60	7.50	55.30	52.10	2678.00	186.00	76.90	219.00	6.92	306.00
		最大	450.00	4372.00	20.53	126.90	0.22	1.40	83.00	42.50	98.70	270.00	0.21	3.90	8.50	36.60	47.90	2377.00	312.00	71.40	159.00	3.25	292.00
-455 m	4	均值	352.50	4917.00	17.17	205.25	0.36	0.99	43.75	33.15	45.80	228.00	0.21	3.98	8.50	41.70	48.80	2579.50	781.25	122.60	317.98	6.96	399.25
		最小	300.00	1696.00	0.10	73.30	0.09	0.76	7.20	10.80	8.80	36.10	0.21	3.00	9.30	9.70	60.40	3281.00	557.00	165.00	992.00	6.77	1086.0
		最大	414.00	7424.00	0.06	38.90	0.04	0.45	6.20	3.60	9.70	31.30	0.21	2.50	8.20	6.40	72.20	3794.00	505.00	107.00	1616.0	5.75	1510.0
-505 m	2	均值	357.00	4560.00	0.08	56.10	0.07	0.61	6.70	7.20	9.25	33.70	0.21	2.75	8.75	8.05	66.30	3537.50	531.00	136.00	1304.0	6.26	1298.0
		最小	5.25	34.84	0.10	41.80	0.03	0.27	9.00	0.80	25.80	36.10	0.21	3.90	7.50	7.00	71.30	4038.00	385.00	58.60	845.00	26.58	1675.0
		最大	441.00	3531.00	41.33	389.40	1.28	0.42	27.20	66.00	101.0	44.30	0.21	2.30	8.00	93.40	38.90	2399.00	90.00	40.00	50.00	4.29	174.00
-550 m	4	均值	202.31	1976.96	16.80	149.40	0.38	0.37	23.53	29.10	53.73	39.90	0.21	2.80	7.60	39.78	53.58	3034.00	237.50	77.08	395.68	10.40	766.50
		最小	38.20	1521.00	0.11	55.70	0.04	0.42	18.00	4.40	9.10	36.20	0.25	4.20	12.5	14.70	60.30	3470.00	441.00	99.50	746.00	9.55	781.00
		最大	1140.0	13970.0	2.22	51.00	0.07	16.0	56.80	13.70	7.80	69.80	0.21	17.9	13.5	21.00	53.90	3021.00	585.00	334.00	397.00	11.86	471.00
-595 m	7	均值	454.20	6324.00	8.07	73.16	0.12	3.93	41.43	21.01	20.86	68.46	0.64	19.3	11.0	29.84	51.80	3016.14	351.00	107.41	400.61	17.26	645.14

2-3 号脉 28 线，在-550 m 中段表现为前缘晕(Sb, Hg)+ 近矿晕(Ag, Cu, Pb)；-595 m 中段表现为近矿晕(Au, Zn)+ 后尾晕(Co, V, Ti, Mn)，为正常分带序列，代表一个完整矿体的存在，矿体在-595 m 往下可能趋于尖灭，深部是否还有新的矿体有待研究。

2-2 号脉 7 线，在-415 m 中段呈现尾晕(Mo, Co, V, Ti, Mn)+ 前缘晕(Ba, F)，至-455 m 中段出现前缘晕(Sb, Hg)+ 近矿晕(Au, Ag, Cu, Pb, Zn)，表明上部矿体在-415 m 中段开始尖灭，在-455 m 中段矿体再现，预测 7 线 2-2 号脉在深部(-415 m~-700 m)找矿空间较大。

2-2 号脉 15 线，在-330m 中段为后尾晕(V, Ti, Mn)+ 前缘晕(As, Ba, F)，-375m 中段后尾晕(Mo, Co, Ni)+前缘晕(Sb, Hg)+ 近矿晕(Au, Ag, Cu, Pb, Zn)，-415 m 中段出现后尾晕，表明矿体往下可能延伸有限，趋于尖灭。

2-1 号脉 7 线，在-330 m 和-375 m 中段为前缘晕(As, Sb, Hg, Ba, F)+ 近矿晕(Ag, Cu, Pb, Zn)，到-415 m~-455 m 出现近矿晕(Au)+ 后尾晕(Mo, Co, V, Ti, Mn)，表明-455 m 中段以下矿体延伸有限，也可能开始趋于尖灭。

2-1 号脉 15 线，在-330 m 中段为后尾晕(Co, V, Ti, Mn)+ 前缘晕(F, Ba)，在-375 m 为中段前缘晕(Sb)+ 近矿晕(Cu, Pb)，到-455 m 中段变为前缘晕(As, Hg)+ 近矿晕(Au, Ag, Zn)，表明-330 m 中段开始出现新矿体，主矿体在-330 m 中段以下，-455 m 中段还没有出现后尾晕，表明矿体往下可能还有较大延伸。

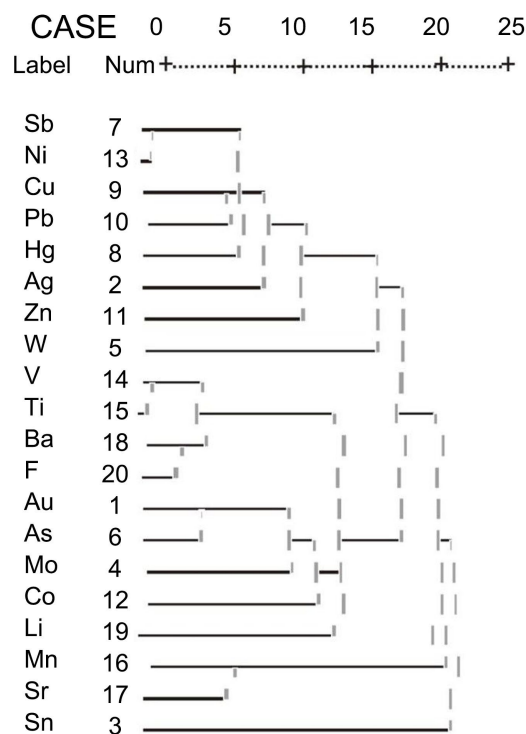


Figure 7. R-type cluster analysis of trace elements in the Banxi mining area
图 7. 板溪矿区微量元素 R 型聚类分析图

根据我们的预测，由湖南有色二总队(2017)勘查所对 2-3 号脉实施两个钻孔验证，在-800 m 深部均打到较好的工业矿体，其中，锑品位 1.31%~44.16%，金品位 0.12 g/t~1.37 g/t。说明构造叠加晕找矿方法有效，板溪锑矿区深部锑金矿仍具有较大的找矿潜力。

6. 成果与结论

综上所述，主要取得如下几点成果：

(1) 板溪锑矿的矿床规模达中型，属石英脉型金锑矿床。矿床的形成与构造、地层岩性、岩浆活动和围岩蚀变等因素密切相关。

(2) 板溪锑矿主要受断裂控制，矿脉走向主要为北东向，矿体空间分布呈梭状或长条状雁列展布，矿体倾斜延深是走向延长的 1~1.5 倍，矿体整体往南西侧伏。矿石矿物以辉锑矿为主，伴生有毒砂、黄铁矿和微量自然金、黄铜矿和闪锌矿。成矿过程分为四个阶段，金矿化形成于石英-毒砂-黄铁矿阶段。

(3) 矿化富集规律主要表现为北东向矿脉为主、伴生金，东西向矿脉含金为主、共生锑；F1 下盘近背斜轴部矿化好，上盘远离背斜轴部矿化差；小构造发育或叠加出现的地段矿化富集；矿脉围岩为凝灰质板岩、变沉凝灰岩且有夹层时矿化较好，当矿脉进入纯板岩时矿化虽较强，但厚度变薄；2 号脉带矿化富集中心往南西方向呈侧式排列。

(4) 金矿是板溪矿区除辉锑矿之外的主要矿种，矿床中金锑共生，北北东向矿脉以含锑为主，东西向矿脉以含金较高为特点，伴生锑。金主要存在于黄铁矿和毒砂中，并且以包裹金的形式存在。成矿元素相关性分析显示，金与锑无明显的正负相关关系，有点“若即若离”，显示出一定的不稳定性和变化性。与金相关性最为密切的元素是 As、Mo、Co，为一个元素组合，反映出多金属的矿化阶段，说明金与锑的成矿就位时间稍有差别。

(5) 板溪 2 号脉带金矿化富集中心具有往南西侧伏或侧列的规律, 显示出往深部靠近大福坪断裂(F1) 的方向具有良好的找金潜力。通过原生晕样品分析结果预测深部矿体向下找矿空间较大, 建议 2-3、2-2 号脉往深部注重南西侧的找矿, 并注意金的富集趋势。预计深部铋 + 金可达中型规模。

最后, 经过两个钻孔工程验证, 在-800 m 深部均打到较好的工业矿体, 说明构造叠加晕找矿方法有效, 板溪铋矿区深部仍具有较大的铋金矿找矿潜力。板溪铋矿深部金矿化的发现对区域找矿及老矿山资源可持续利用及危机矿山寻找接替资源均具有重要借鉴意义。

基金项目

本文得到湖南省自然资源厅科技项目支持, 2022 年度湖南省自然资源重大科技研究项目资助(项目编号: 2017-04, 2019-07; 湘自资料【2022】2 号)。

参考文献

- [1] 罗献林. 湖南板溪铋矿床的成矿地质特征[J]. 桂林工学院学报, 1995, 15(3): 231-242.
- [2] 唐宇蕾, 孔华, 吴玺虹, 奚小双. 板溪铋矿床流体包裹体研究[J]. 地质找矿论丛, 2017, 32(3): 391-396.
- [3] 梁英国, 石坚, 周溪, 刘伍安, 黄建伟. 板溪铋矿 2 号矿脉带成矿模型分析[J]. 南方金属, 2023(3): 17-20.
- [4] 胡楚南. 桃江县板溪铋矿床地质特征及成矿构造分析[J]. 湖南地质, 1991, 10(4): 317-320.
- [5] 陈强壮. 湖南省桃江板溪铋矿成矿区成矿规律分析及找矿预测[J]. 中国锰业, 2004, 22(4): 35-38+41.
- [6] 付胜云, 邓蕾, 唐分配, 沈长明, 谭盛阶, 张惠, 李大江. 湖南安化—桃江地区铋矿地质特征及找矿标志[J]. 金属矿山, 2016, 45(11): 113-118.
- [7] 于春胜. 板溪铋矿矿床地质特征及今后的找矿方向[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 588-590.
- [8] 唐朝晖. 板溪铋矿矿床成因分析及应用研究[J]. 科技信息, 2011(20): 412.
- [9] 刘崇民. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1528-1538.
- [10] 权正钰, 王甫仁. 雪峰弧形构造带与金铋矿床[J]. 国土资源导刊, 1998(A11): 1-46.
- [11] 阎明, 马东升, 刘英俊. 淘金冲金矿成矿流体地球化学和矿床成因研究[J]. 矿床地质, 1994, 13(2): 156-162.
- [12] 赵建光, 陈强春. 湖南铲子坪式金矿床地质-地球物理-地球化学及综合找矿模式[J]. 国土资源导刊, 2006, 3(3): 80-83.