第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：龙登红，杨涛，任广利，等. 西秦岭宕昌–西和锑矿集区勘查新进展及成矿预测研究[J]. 西北地质，2026，59(5)：274−287. DOI：10.12401/j.nwg.2026006

Citation：LONG Denghong, YANG Tao, REN Guangli, et al. New Discoveries and Prospecting Prediction of the Tanchang-Xihe Antimony Ore Cluster, West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(5): 274−287. DOI: 10.12401/j.nwg.2026006

西秦岭宕昌–西和锑矿集区勘查新进展及成矿预测研究

龙登红[1,2,3]，杨涛[1,2,4,*]，任广利[5]，杨镇熙[1,2,3]，王思成[1,2,3]，田璟[1,2,3]

（1. 甘肃省矿产资源勘查重点实验室，甘肃 兰州 730000；2. 甘肃省矿产资源综合勘查利用与保护工程研究中心，甘肃 天水 741020；3. 甘肃省地矿局第一地质矿产勘查院，甘肃 天水 741020；4. 甘肃省地质矿产勘查开发局，甘肃 兰州 730000；5. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心，陕西 西安 710119）

摘 要：宕昌–西和地区是西秦岭地区乃至西北地区最为重要的锑(金)矿集区，已发现了西和县崖湾、宕昌县泰山、宕昌县瓦石沟等大型锑矿床和西和县大桥超大型金矿床。区内近年来锑矿勘查取得多项重要进展，对其研究将有助于推动成矿带整体找矿突破。新发现的宕昌县白杨坝中型锑矿床，具有矿带走向延伸长度大、尖灭再现和平行断裂构造均赋矿的特征；新发现的宕昌庙沟小型锑金矿床，是矿集区内首次发现锑金共伴生矿床，为矿集区找矿提供新思路，需加强金矿找矿部署；宕昌县瓦石沟锑矿矿体受控于断裂和褶皱形成的构造虚脱空间规模，走向延伸稳定，局部特大空腔可富集形成巨大矿囊；宕昌县草山沟锑矿深部勘查成效显著，矿体垂向延伸方向具有深度大、尖灭再现的特征。理论研究认为降温是辉锑矿沉淀主要机制，pH 值向中性变化将进一步促进辉锑矿沉淀，结合矿集区成矿特征总结，锑矿受多级次构造和地层岩性双重控制，区域上合作–宕昌–两当深大断裂控制了主要锑矿集区分布，次级断裂和褶皱构造是锑矿主要赋矿位置，泥质岩石常常形成锑矿隔挡层，钙质砂岩和灰岩是有利储矿层位。建立综合找矿模型，构造背景、控矿构造、赋矿地层、岩性建造、蚀变特征和化探异常是主要找矿要素。使用地球化学多元信息融合技术方法对 1∶5 万水系沉积物测量数据进行处理分析，开展找矿预测，新圈定找矿靶区 9 处。研究综合显示，矿集区锑(金)矿找矿潜力巨大，需要根据锑矿成矿规律，加强锑金矿勘查部署，力争矿集区进一步取得全面找矿突破。

关键词：西秦岭；宕昌–西和地区；锑矿集区；勘查进展；找矿预测；勘查模型

中图分类号：P612 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0274-14

New Discoveries and Prospecting Prediction of the Tanchang-Xihe Antimony Ore Cluster, West Qinling

收稿日期：2025-12-16；**修回日期**：2026-03-31；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：深地国家科技重大专项(2025ZD1009600)，甘肃省自然科学基金(24JRRE017)，自然资源部科技支撑项目(ZKKJ202415)及甘肃省陇原青年英才资金联合资助。

作者简介：龙登红(1987−)，男，高级工程师，主要从事找矿预测研究。E−mail：625571323@qq.com。

*** 通讯作者**：杨涛(1987−)，男，正高级工程师，主要从事成矿规律研究。E−mail：yangtlzu@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

LONG Denghong[1,2,3], YANG Tao[1,2,4,*], REN Guangli[5], YANG Zhenxi[1,2,3], WANG Sicheng[1,2,3], TIAN Jing[1,2,3]

（1. Gansu Province Key Laboratory of Mineral Exploration, Lanzhou 730000, Gansu, China；2. Gansu Engineering Research Center for Comprehensive Exploration Utilization and Protection of Mineral Resources, Tianshui 741020, Gansu, China；3. The First Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tianshui 741020, Gansu, China；4. Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730000, Gansu, China；5. Xi an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China）

Abstract：The Tanchang-Xihe area represents the most important antimony (gold) ore district in the West Qinling region and even the wider northwestern China. It hosts several large antimony deposits（Yawan, Taishan and Washigou）, as well as the super-large Daqiao gold deposit. Recent exploration has yielded significant advances. The newly discovered Baiyangba antimony deposit (medium-sized) is characterized by a large strike extent of ore belts, with ore bodies occurring in both pinch-out-reappearance structures and parallel fault zones. The Miaogou antimony-gold deposit (small-sized) is the first Sb-Au paragenetic deposit identified in the district, offering new exploration directions and highlighting the need to strengthen gold exploration efforts. At the Washigou antimony deposit, the ore bodies controlled by structural dilation spaces formed by faults and folds, exhibiting stable strike extensions and locally developed large cavities that host giant ore pockets. At the Caoshangou antimony deposit, significant deep exploration results reveal considerable vertical extension and pinch-out–reappearance characteristics of the ore bodies. Theoretical studies indicate that cooling is the primary mechanism for stibnite precipitation, and a shift toward neutral pH further promotes this process. Regional metallogeny is jointly controlled by multi-order structures and lithological units. The Hezuo-Tanchang-Liangdang deep fault governs the distribution of the ore district, whereas secondary faults and folds serve as the main ore-hosting structures. Argillaceous rocks act as impermeable barriers, while calcareous sandstones and limestones constitute favorable host units. A comprehensive exploration model has been established incorporating tectonic setting, ore-controlling structures, host strata, lithological associations, alteration characteristics, and geochemical anomalies. Using multi-information fusion of 1∶50000 stream sediment geochemical data, nine new exploration targets have been delineated.Overall, the ore district exhibits significant potential for Sb-Au mineralization. Further exploration efforts should be strengthened based on the metallogenic characteristics to achieve a full breakthrough.

Keywords：Western Qinling；Tanchang-Xihe district；antimony ore cluster；exploration progress；exploration model；prospecting prediction

锑具有特有的热缩冷胀物理性质, 是极度稀缺且不可再生的矿产资源, 广泛应用于阻燃剂、铅酸电池、光伏和催化剂等领域(董延涛等, 2020; 张会琼等, 2024; 吕宏伟等, 2025)。全球锑矿资源主要分布在环太平洋沿岸、地中海地带以及中亚天山构造成矿带, 储量从高到低依次为中国、俄罗斯、玻利维亚、吉尔吉斯斯坦等国。中国锑矿主要分布在湘中–湘西、桂北–黔南、西藏、秦岭等地区, 多处于大地构造单元边缘地带, 受板块缝合线或深大断裂制约(王永磊等, 2013; 丁建华等, 2013)。

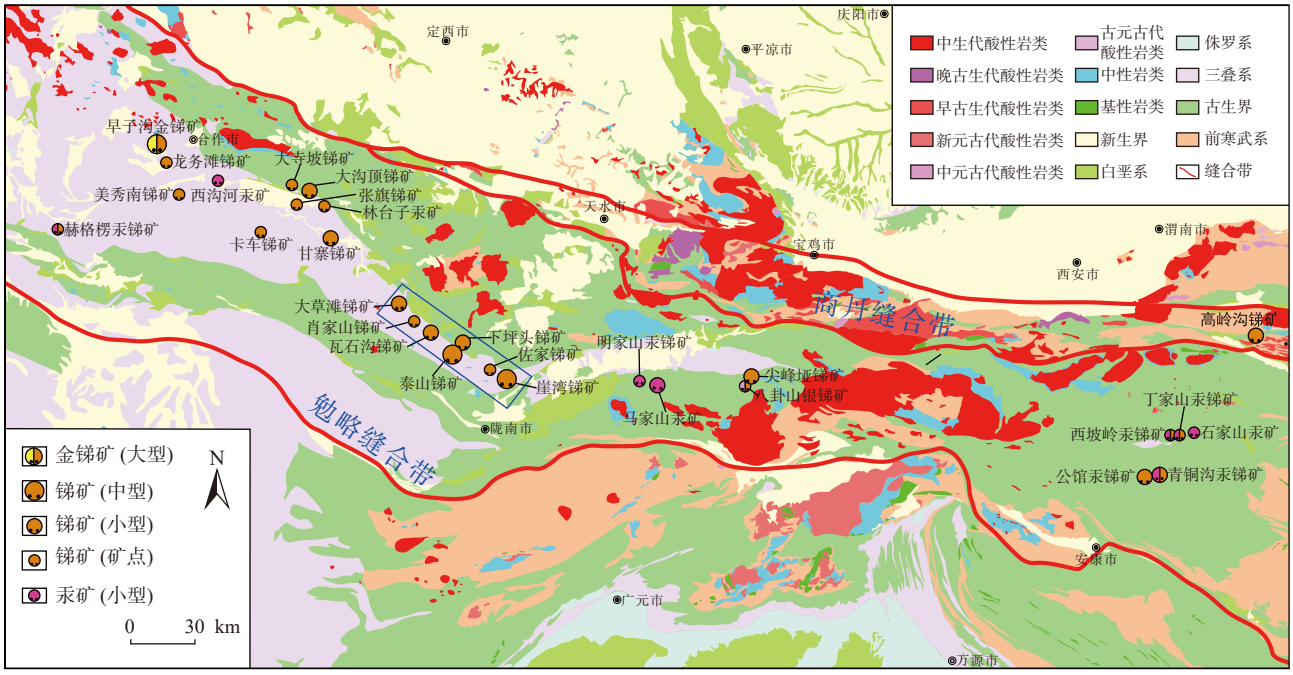
西秦岭地区作为中国重要的锑矿资源基地之一, 处于特提斯构造域、太平洋构造域和古亚洲构造域三大构造动力学体系汇聚地区(张国伟等, 2004; 李康宁等, 2024; 姜寒冰等, 2024)。西秦岭锑矿主要聚集于甘肃省宕昌–西和、甘南合作等地区, 其中以宕昌–西和地区是西秦岭乃至西北地区最大的锑矿集区(彭德启等, 2008; 洪百雄等, 2009, 2010)。近年来, 区内锑矿勘查取得重要新进展, 通过总结控矿因素和建立勘查模型, 开展找矿预测研究, 对于助推矿集区及西秦岭锑找矿突破具有重要意义。

1　区域地质背景

秦岭锑矿成矿带呈 NWW 向展布, 东起于陕西省公馆锑矿、西止于青海省, 长度大于 600 km(图 1), 其中甘肃境内锑矿带长度约为 350 km。秦岭成矿带 95 %

的锑矿床和矿(化)点均产于合作–宕昌–两当的深大断裂带两侧边部，主要分布在断裂带南侧。该断裂带将秦岭分隔为中秦岭新元古代—晚古生代裂陷大陆边缘构造单元和南秦岭新元古代—早中生代裂陷大陆边缘构造单元(丁仨平等，2023)，总体呈一向南突出的弧形断裂带，向东延伸进入陕西省，向西延展进入青海省。沿着断裂带边部自东向西分布有宕昌–西和、岷县–卓尼、甘南等锑矿集区，其中最主要锑矿床均分布于宕昌–西和锑矿集区。

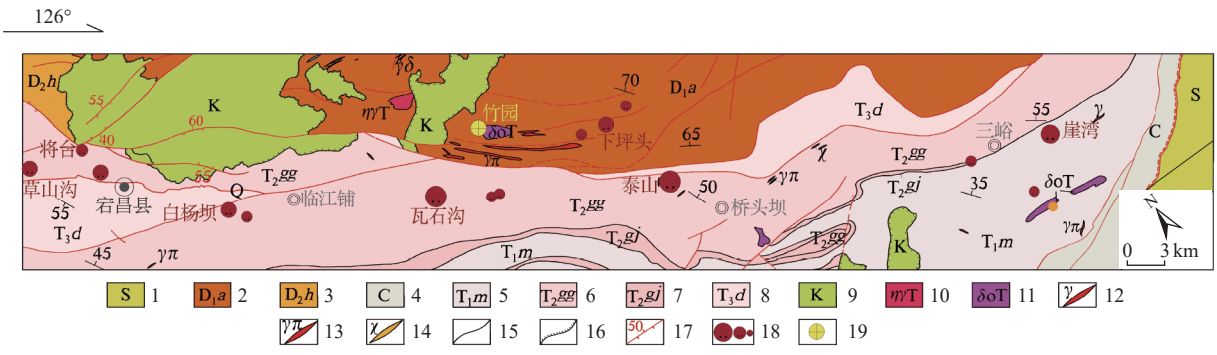
研究区位于西秦岭造山带中部地区(图 2)，成矿带属南秦岭华力西期—燕山期金、铀、锰、铅锌、银、铜、铁、汞、锑、磷、重晶石成矿带(Ⅲ-11)鹿儿坝–崖湾金、锑成矿亚带(IV-23)(张新虎等，2014)。区内以宕昌–西和断裂为界限(区域上为合作–宕昌–两当大断裂)，北侧属中秦岭夏河–礼县陆缘沉积区，南侧属南秦岭泽库–武都裂陷沉积区(丁仨平等，2023)。其中，中秦岭夏河–礼县陆缘沉积区主要出露泥盆系，主要岩性为安家岔组(D_1a)碎屑岩建造和黄家沟组(D_2h)



底图来源于秦岭成矿带及邻区 1∶50 万地质矿产图

图1　秦岭造山带区域地质及锑矿床分布图

Fig. 1　Regional geology and distribution of antimony deposits in the Qinling orogenic belt



1. 志留系；2. 泥盆纪安家岔组；3. 泥盆纪黄家沟组；4. 石炭系；5. 三叠纪马热松多组；6. 三叠纪光盖山组；7. 三叠纪郭家山组；8. 三叠纪大河坝组；9. 白垩系；10. 二长花岗岩；11. 石英闪长岩；12. 花岗岩脉；13. 花岗斑岩脉；14. 煌斑岩脉；15. 地层界线；16. 角度不整合界线；17. 逆断层；18. 锑矿(大中小)；19. 金矿床

图2　宕昌–西和锑矿集区地质矿产简图

Fig. 2　Simplified geological and mineral resource map of the Tanchang-Xihe antimony ore cluster

复理石建造, 以及少量的白垩系(K)和侏罗系(J)陆相沉积碎屑岩建造; 南秦岭泽库–武都裂陷沉积区主要出露三叠系, 主要岩性为马惹松多组(T_1m)灰岩与粉砂岩互层、郭家山组(T_2gj)中厚层灰岩夹板岩、光盖山组(T_2gg)灰岩与板岩互层、大河坝组(T_3d)碎屑岩夹灰岩建造, 为区域主要锑矿的含矿建造。

研究区内岩浆活动较弱, 分布少量三叠纪二长花岗岩、石英闪长岩等岩体, 出露面积仅数平方千米, 以及少量花岗斑岩脉、花岗闪长岩脉等, 显示与锑成矿关系不显著。研究区中部分布区域性深大断裂, 两侧发育近于平行和斜交的次级断裂, 深大断裂带控制了矿集区和矿床的分布, 为成矿深部物质来源主通道; 次级断裂和小型褶皱构造为成矿提供了良好的运移通道和储矿空间。区内磁场总体平稳, 以−30 ～0 nT 的平静负磁场为背景, 反映区内深部岩浆活动微弱。区内 1∶5 万化探工作圈定了大量化探异常, 异常元素主要以 Sb、As、Hg、Au、Pb、Zn、Ag 等, 多数异常内已发现锑矿床(点)。区内已发现崖湾、泰山、瓦石沟等 3 处大型锑矿床、10 余处中小型锑矿床, 构成崖湾–大桥金锑矿整装勘查区(刘永胜等, 2023)。

2　典型矿床分析

近年来, 研究区内新发现了宕昌县白杨坝锑矿(中型)、将台锑矿(小型)、庙沟锑金矿(小型)、虎娃滩锑矿(小型)等, 上述矿床目前正在实施勘查工作中, 实现锑矿勘查新区突破; 宕昌县瓦石沟、草山沟等锑矿床商业勘查中取得重要新进展, 尤其瓦石沟锑矿勘查新增锑资源量显著, 是西秦岭近年来最大锑矿勘查成果。笔者对新发现的白杨坝锑矿、庙沟锑金矿, 以及勘查取得重要突破的瓦石沟、草山沟等锑矿床的成果进行简要叙述, 总结分析找矿指示重要意义, 服务矿集区内及成矿带上的锑矿勘查工作。

2.1　宕昌县白杨坝锑矿床

该矿床矿集区内新发现中型锑矿床。矿区主要出露三叠系大河坝组三段(T_2d^3), 划分为 5 个岩性层, 其中三层为主要赋矿层位; 三段一层($T_2d^{3\text{-}1}$)为粉砂质灰岩为主; 三段二层($T_2d^{3\text{-}2}$)为粉砂质灰岩与泥灰岩互层; 三段三层($T_2d^{3\text{-}3}$)为灰岩夹粉砂岩或钙质粉砂岩, 局部夹石英砂岩, 为主要锑矿赋矿层位; 三段四层($T_2d^{3\text{-}4}$)为粉砂质灰岩与泥灰岩互层; 三段五层($T_2d^{3\text{-}5}$)为粉砂质灰岩夹泥灰岩。岩浆岩不发育, 仅分布少量中酸性脉岩, 在锑矿化带内脉岩裂隙中有辉锑矿充填, 在远离锑矿化带的脉岩中皆无矿化。区内断裂构造发育, 发育 NWW、NNE、NNW 3 组。其中, NWW 断裂及其派生的次级断裂和节理为辉锑矿的主要容矿构造; 区内发育 NWW 倾伏的层间小型褶曲, 部分褶皱轴部充填辉锑矿脉, 为区内主要容矿构造之一。

已发现矿化带 2 条, 圈定锑矿体 7 条。I 矿带为主要锑矿体分布区(图 3), 整体呈 NW–SE 走向, 控制长为 870 m, 宽为 5～55 m, 分布锑矿体 5 条; 其中Ⅰ-1 矿体规模最大, 控制长为 555 m, 厚度为 0.41～6.00 m, 平均厚度为 2.38 m, 锑品位为 0.68 %～12.89 %, 平均品位为 2.63 %, 矿体产状 10 ～51 °∠62 ～75 °; 沿倾向最大控制垂深 260 m, 最大斜深 280 m。矿体顶板为薄层状砂质灰岩、粉砂岩夹泥灰岩, 底板为薄–中层状砂质灰岩夹少量泥灰岩。矿石矿物成分以辉锑矿为主, 局部分布少量黄铁矿; 脉石矿物以石英、方解石为主, 其次为萤石等。矿石结构主要有柱粒状、放射状及交代残留结构, 其次为角砾状结构; 矿石构造以晶簇状、脉状构造为主, 其次为块状、浸染状、放射状等(图 4)。围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、萤石化绿泥石化、高岭土化等, 硅化与辉锑矿关系最为密切, 尤其是硅化蚀变范围、强度与锑矿规模和品位呈密切正相关。

锑矿由于受控于 NW 向断裂构造, 该组构造延伸长度大, 形成的锑矿化带沿走向延伸较为稳定, 带内锑矿体具有尖灭再现的特征, 受赋矿空间大小决定矿体规模, 沿着控矿构造追索能够获得显著找矿成效。区内与 I 矿带平行分布的两条 Sb 元素化探异常带, 经过探槽揭露和钻孔深部验证, 为两条平行展布的构造破碎带。由于地表植被覆盖未能识别, 破碎带中形成与 I 矿带平行分布的两条锑矿化带, 证明土壤地球化学测量是锑矿有效勘查技术手段。当存在与主矿带平行分布的化探弱异常带或弱锑矿化线索时, 需要详细开展详细查证和勘查工作。

2.2　宕昌县瓦石沟锑矿

该矿床经近期勘查后已达大型规模。矿区主要出露三叠系大河坝组一段(T_2d^1), 矿区内分为 4 个岩性层, 其中三层($T_2d^{1\text{-}3}$)为主要赋矿层位, 岩性主要为泥质粉砂岩、石英砂岩夹泥质粉砂岩。区内岩浆活动不明显。受深大断裂影响, 区内次级断裂和褶皱构造发育, 含矿主断裂近 EW 向; 整体为一单斜构造, 层内较为发育层间褶皱构造, 晚期少量发育 NE 向的晚期

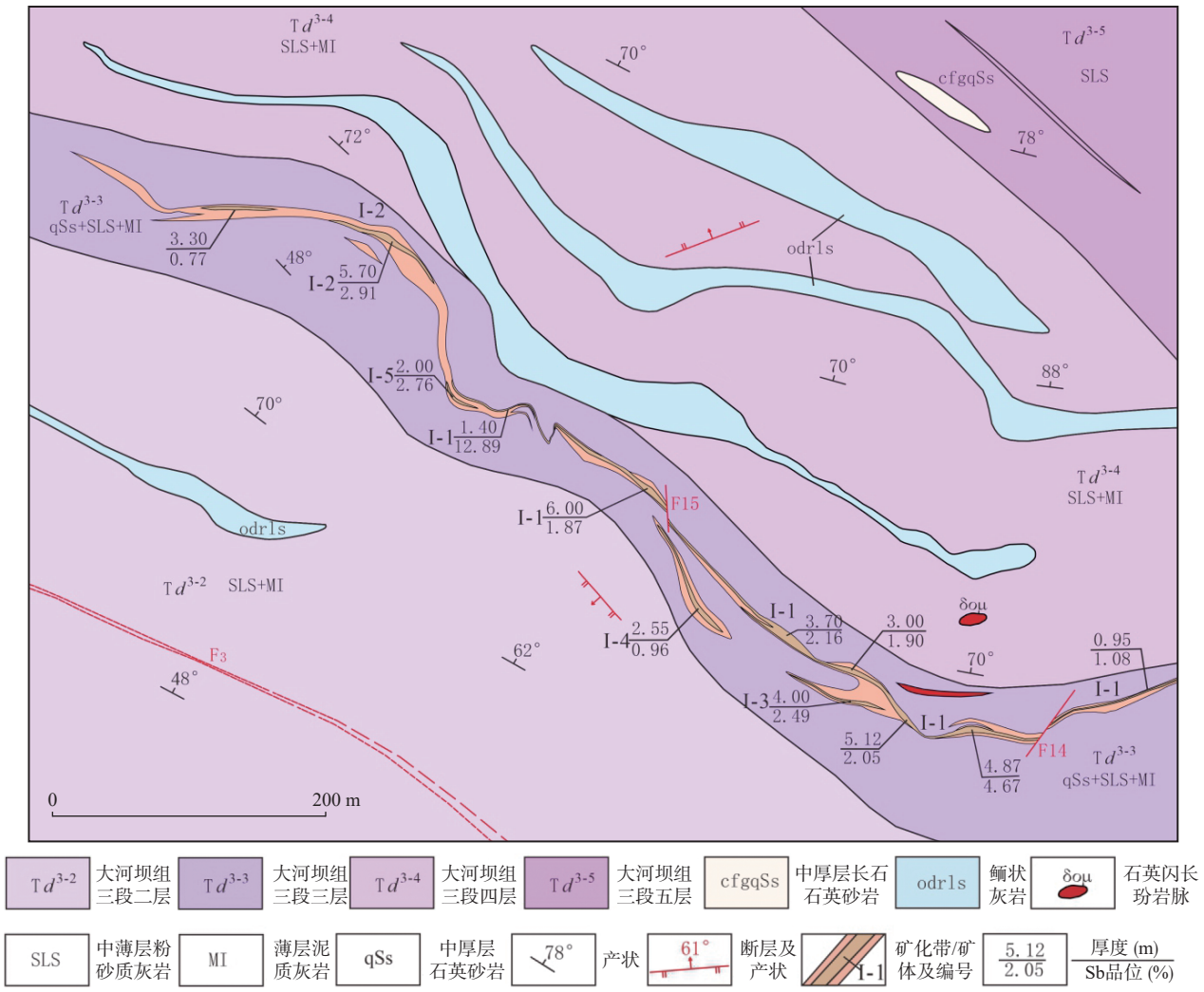


图3 白杨坝锑矿矿区地质简图

Fig. 3 Geological map of Baiyangba antimony deposit

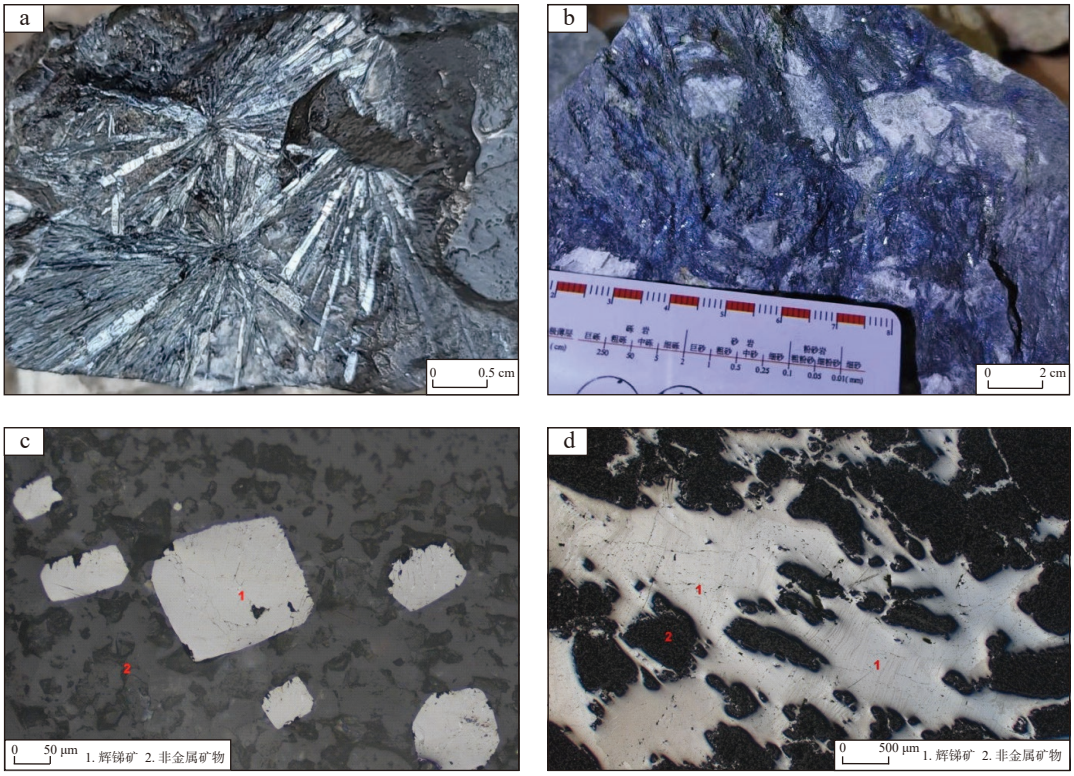
小型褶皱。

区内已发现锑矿化带两条，其中Ⅰ号矿化带延伸长为 1.30 km，宽为 10～60 m，带内共圈定锑矿(化)体 13 条。其中，SbⅡ矿体为主矿体，控制长度为 1 100 m，控制斜深达 450 m，厚度为 0.8～24.37 m，平均厚度为 4.12 m，单工程 Sb 品位为 0.75 %～13.49 %，矿体 Sb 平均品位为 4.42 %(图 5)。Ⅱ号矿化带长约为 600 m，宽度为 1.2～15 m 不等，圈定矿体 3 条，矿体规模较小。矿体严格受层位及构造控制，沿走向和倾向具尖灭再现的特点，局部存在矿体膨大现象。矿石中的金属矿物以辉锑矿为主，少量及微量黄铁矿、毒砂、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等；脉石矿物主要为石英、玉髓、碳酸盐，少量萤石、绢云母、白云母、榍石、金红石、高岭石、重晶石、绿泥石等。矿石结构主要为自形–半自形柱状结构、他形粒状结构、压碎结构等，矿石构造主要有浸染状构造、放射状、角砾状构造、团块状构造、脉状–网脉状构造等(图 6)。围岩蚀变主要有硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、萤石化、高岭土化等。其中，硅化、萤石化、碳酸盐化在含锑矿带内分布最为广泛，硅化蚀变范围越大、越强，锑矿规模也越大、品位也越富。

通过总结赋矿规律，显示主断裂带控制着锑矿带的分布，次一级的断裂裂隙是主要的赋矿空间，褶皱构造(尤其是背斜构造的核部)也是锑矿体分布和产出的主要部位；锑矿主要分布于相对脆性的砂岩中，岩石在发生构造变形时易形成大量构造空腔，是锑矿沉淀和储矿的有利空间，透水性较弱的泥质粉砂岩及断层泥均可成为锑矿的遮挡层。

2.3 宕昌县草山沟锑矿

该矿床近年来深部勘查取得重要新进展，达到中



a.辉锑矿呈放射状；b.辉锑矿充填于裂隙中；c.辉锑矿呈自形柱状；d.辉锑矿呈浸染状

图4　白杨坝锑矿典型矿石照片

Fig. 4　Photographs of typical ore from Baiyangba antimony deposit

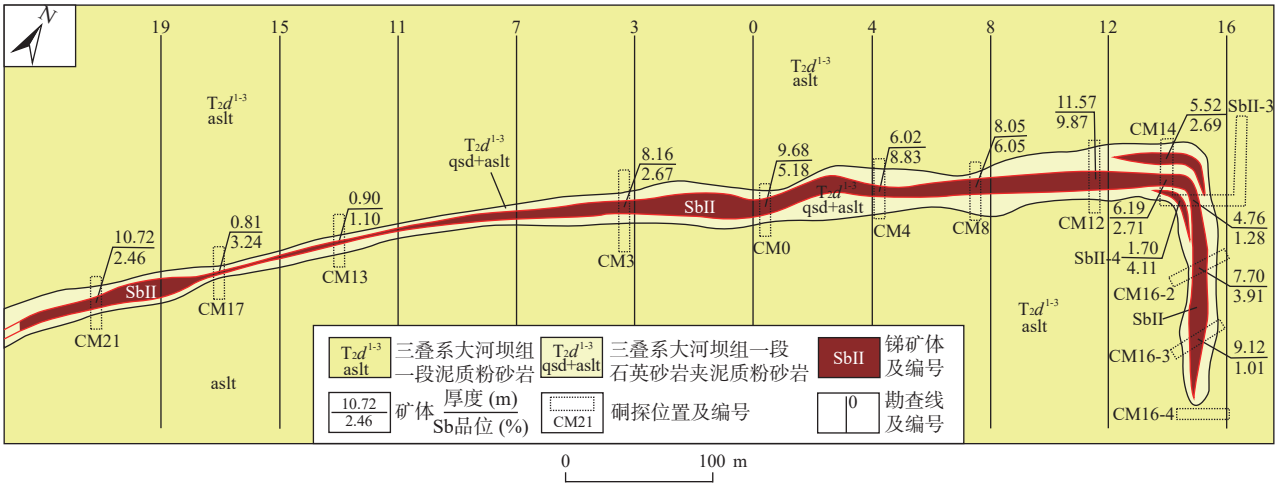
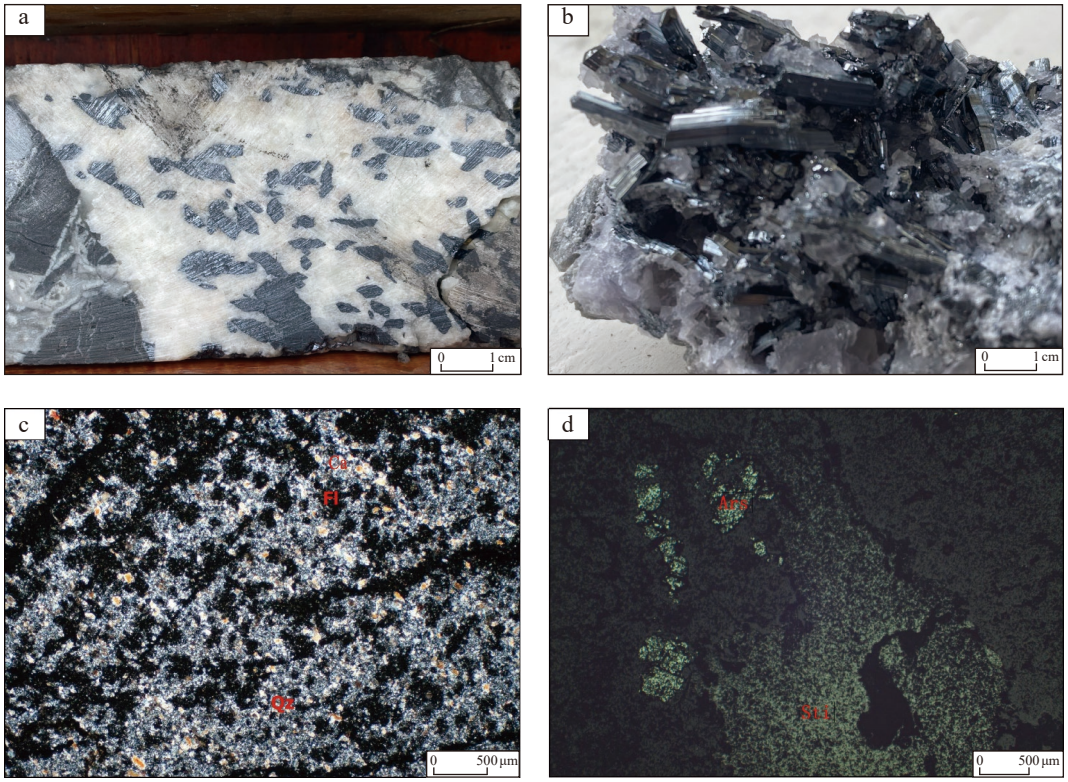


图5　瓦石沟锑矿矿区地质简图

Fig. 5　Geological map of Washigou antimony deposit

型规模。矿区主要出露三叠系大河坝组和下马龙组，下马龙组一段为主要赋矿单位，岩性为灰黑色硅化石英砂岩/粉砂岩和钙质粉砂岩夹少量泥质粉砂岩；二段为粉砂质板岩，未发现矿化集中地段。石英闪长岩脉地表零星露头，但在不同标高的坑道中发现大量石英闪长岩脉，标高越低石英闪长岩脉越发育、越厚大，为成矿前形成；石英闪长岩脉中的部分断裂带及邻近的节理裂隙中绿泥石化、黄铁矿化和褐铁矿化较强，其中发育辉锑矿(化)体。矿区位于深大断裂带边部，次级断裂和小褶皱构造发育，其中 NW 向瓦窑沟构造破碎带为矿区的控矿构造。

矿区圈定 3 条锑矿带，蚀变带长度大于 900 m，宽



a.破碎带中辉锑矿与方解石、石英共生；b.辉锑矿呈放射状；c.薄片中石英(Qz)65%，萤石(Fl)25%，碳酸盐(Ca)5%，金属矿物 5%；d.光片中可见辉锑矿(Sti)、毒砂(Ars)等金属矿物

图6 瓦石沟锑矿典型矿石照片

Fig. 6 Photographs of typical ore from Washigou antimony deposit

度为 40～90 m，圈定锑矿体 29 条。地表仅Ⅲ-2 矿体出露，其他矿体均为盲矿体。整体上西部矿体较稀疏、规模较小且赋存较深，向东矿体变密集、规模变大且赋存深度逐渐变高。矿体倾向 NE，倾角一般为 70°～80°。矿体长度大于 200 m 的主矿体有 4 条(Ⅰ-1、Ⅲ-1、Ⅲ-2、Ⅲ-3)。主矿体呈似层状、透镜状，其他矿体为脉状。矿体长为 26～283 m，延深为 20～285 m，厚度为 1～3 m，品位为 0.5%～11.4%。赋矿岩性为石英砂岩和粉砂岩、钙质泥质粉砂岩及石英闪长岩。锑矿化受岩性和构造裂隙双重控制，矿化与岩石碎裂程度成正比。矿石矿物以辉锑矿为主，少量黄铁矿、白铁矿、微量磁黄铁矿、褐铁矿、黄铜矿、金红石等；脉石矿物主要为石英，其次为方解石、绢云母，少量黏土矿物绿泥石等。矿体围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化、萤石化等，其中硅化、碳酸盐化、黄铁矿化与成矿关系最为密切。

该锑矿床深部勘查显示，矿体垂向方向延伸大，垂深超过 300 m，在断裂带垂向延伸方向锑矿体存在尖灭再现的特点(图 7)；锑矿(化)体分布于钙质硅化石英粉砂岩夹泥质粉砂岩、闪长岩体等地质体的断裂带中，锑的富集与构造关系最为密切，主要工业矿体都分布于蚀变碎裂带部位。

2.4 岩昌县庙沟锑金矿

矿区出露三叠系隆务河组，岩性中厚层状石英杂砂岩、钙质粉砂岩夹泥灰岩互层；矿区发育 3 条平行分布的 NW 向断裂带，长度大于 2 km，是区内的控矿构造；区内仅发育少量闪长玢岩脉。区域资料显示，整体为北倾的单斜构造，但矿区发现地层主体产状向南倾，推测该区域为向斜的北翼，需进一步查明褶皱形态及分布范围。新发现矿化带两条，其中Ⅰ矿化带长度大于 960 m，宽为 10～25 m，带内已圈定矿(化)体 6 条，厚度为 0.64～3.29 m，Sb 品位为 0.25%～3.19%，Au 品位为 0.20×10^{-6}～1.24×10^{-6}；主矿体 SbⅠ-2 地表由 4 个探槽工程控制，矿体延长大于 950 m，厚度为 0.80～3.28 m，平均厚度为 1.60 m，Sb 品位为 0.48%～3.19%，平均品位为 1.20%；局部锑矿体含 Au 品位为 0.58×10^{-6}(图 8)。Ⅱ矿化带目前圈定锑矿体 1 条，矿体长为 160 m，厚度为 2.47 m，Sb 平均品位为 2.96 %，沿走向具有 Au

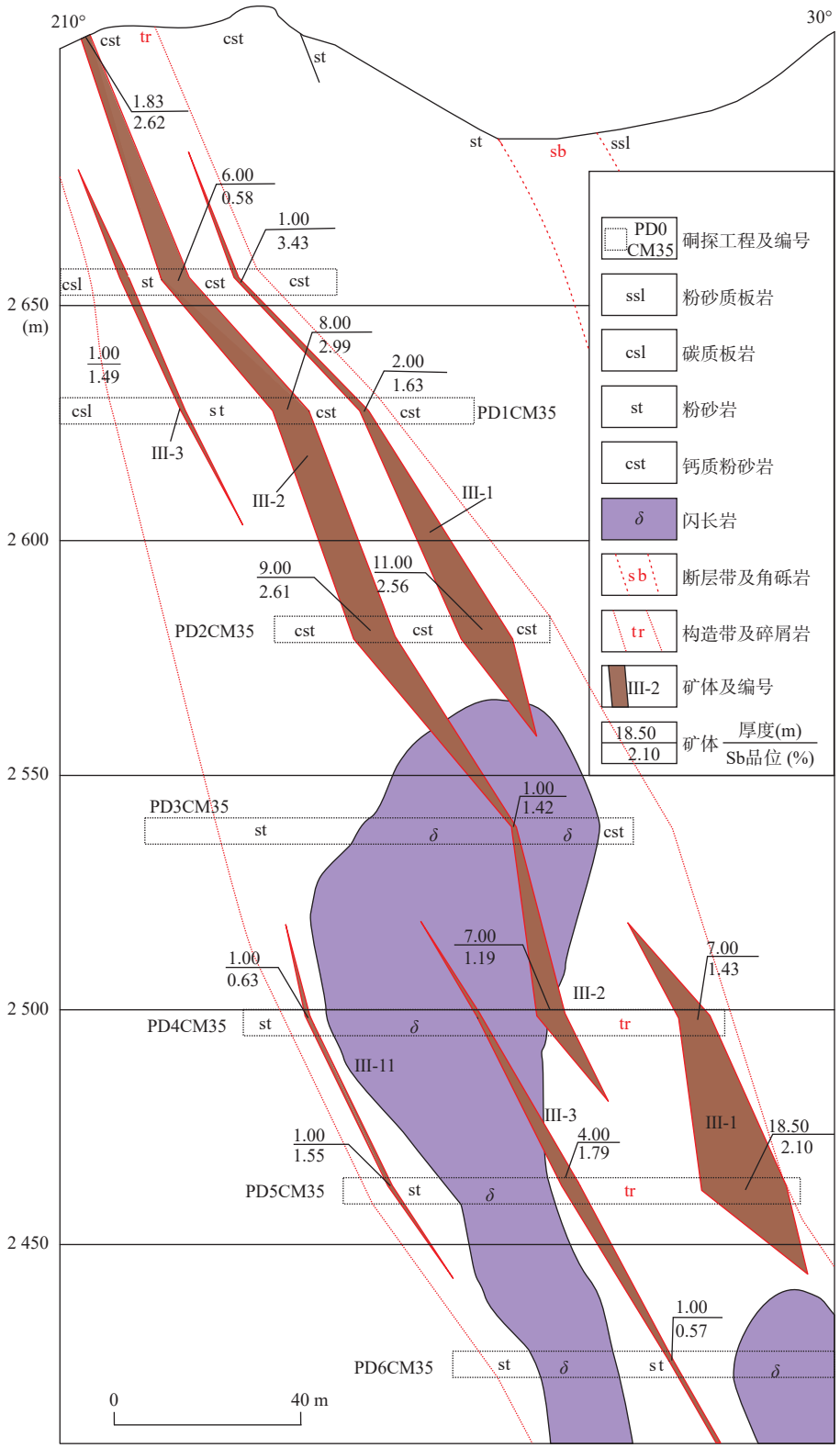


图7　草山沟锑矿 35 号勘查线剖面图

Fig. 7　Section of exploration line 35 in Caoshangou antimony deposit

矿化线索显示。矿石矿物以辉锑矿为主, 少量及微量黄铁矿、毒砂、褐铁矿, 脉石矿物主要为石英、方解石、高岭土、绢云母、绿泥石、萤石等。矿石结构主要有柱粒状结构、他形粒状结构、交代残留结构、角砾状结构等; 矿石构造主要为脉状构造、角砾状构造和条带状构造等(图 9)。

该矿是矿集区内首次发现锑金共伴生矿床，为矿集区找矿提供了新思路，需要进一步梳理其他锑矿区内是否存在金矿化线索。矿集区的东延段分布有西和大桥金矿床，区内分布有竹园中型金矿床，需要进一步加强矿集区综合找矿工作。后期需要开展矿集区内金与锑之间的成矿关系研究，为下一步找矿提供重要借鉴作用。

3 控矿因素分析

3.1 辉锑矿沉淀机制

辉锑矿(Sb_2S_3)是锑矿床最主要矿石矿物，在热液中溶解度主要受温度控制(Pavlova et al., 2006; 叶天竺等, 2014)。锑成矿流体均一温度主要集中在 100～300 ℃，成矿压力为 70～280 MPa，成矿流体盐度≤20% NaCl eq(Naumov et al. , 2018)。辉锑矿在热液中溶解度由 3 种 Sb 络合物控制：HSb_2S^{4-}、$Sb_2S_4^{2-}$和 $Sb(OH)_3$，在 pH=6 和中等硫化物浓度(约 0.01 mol/kg)条件下，100 ℃ 时辉锑矿的溶解度由 HSb_2S^{4-}主导；150 ℃ 时存在 HSb_2S^{4-}和 $Sb(OH)_3$；200 ℃ 时 $Sb_2S_4^{2-}$、HSb_2S^{4-}和 $Sb(OH)_3$ 是主要配合物；250～350 ℃ 时只存在 $Sb(OH)_3$；$Sb_2S_4^{2-}$在弱酸或弱碱性、低硫化物浓度条件下含量低(Olsen et al. , 2019)。

通过流体包裹体测温、稳定同位素、计算模拟等研究认为，辉锑矿可能的沉淀机制包括：流体混合(杜泽忠等, 2013)、水岩反应(彭建堂等, 2001)、沸腾作用(孙晓明等, 2014; 胡阿香等, 2020)等。流体包裹体 Sb 含量的对比与化学平衡计算结果表明，含锑热液在 300 ℃ 以上难以达到饱和状态，通常需要降温至约 300 ℃ 以下才能使辉锑矿沉淀，温度变化可使辉锑矿在热液中的溶解度产生数量级的变化，因此降温是辉锑矿沉淀的有效沉淀机制(赵圣涛等, 2025)。成矿流体向上运移中，在温度缓慢降低且储矿空间发育时，形成晶簇状、放射状锑矿体；在成矿流体快速降温时，

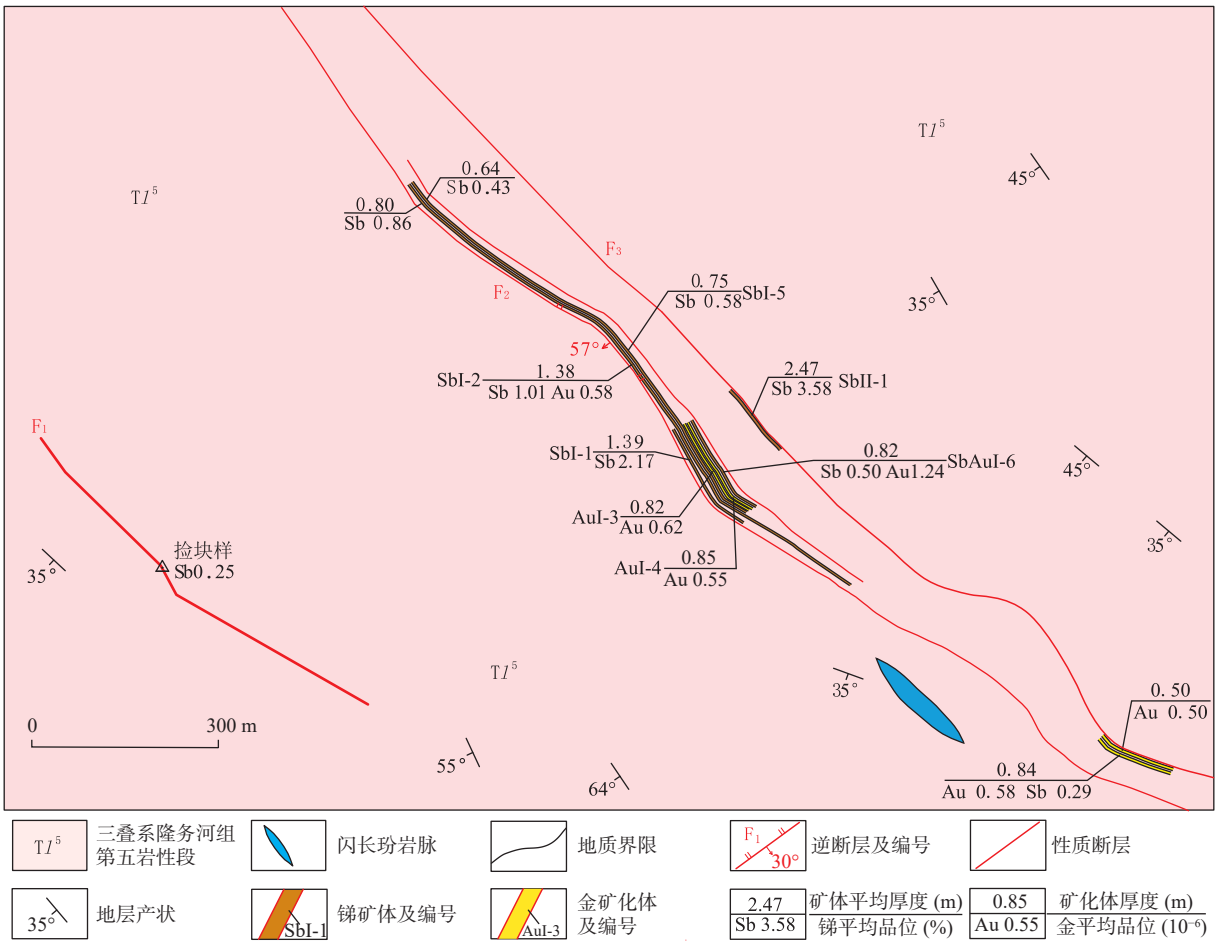
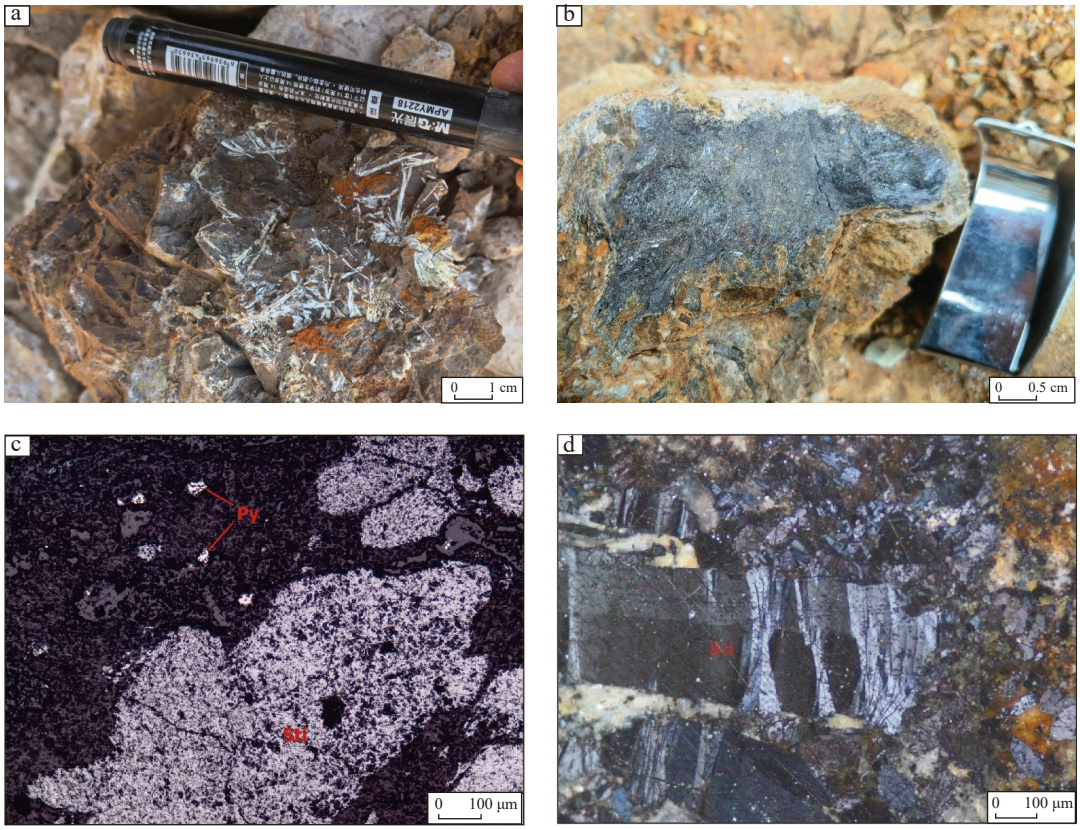


图8 庙沟锑金矿矿区地质简图

Fig. 8 Geological map of Miaogou antimony-gold deposit



a.放射状锑矿石；b.褐铁矿化金锑矿石；c.矿石中辉锑矿(Sti)、黄铁矿(Py)；d.辉锑矿发育聚片双晶

图9　庙沟锑金矿矿石照片

Fig. 9　Photographs of typical ore from Miaogou antimony-gold deposit

快速大规模沉淀形成浸染状辉锑矿石和块状辉锑矿石。由于流体混合等因素造成的成矿流体降温的垂向梯度线基本一致，同一期锑含矿热液沿着断裂带走向会形成标高基本一致的较长矿化带，白杨坝、瓦石沟等锑矿具有显著表现；成矿流体多期次运移上升沉淀成矿，多次适宜成矿温度梯度线存在垂向变化，形成多个锑矿化段，草山沟等锑矿床为典型案例。因此，在矿集区锑矿勘查和找矿新区开拓中，要高度重视锑矿体在同一标高走向上尖灭再现和垂向方向存在多个矿化段的特征。

辉锑矿在热水溶液的形成温度一般在 50～100 ℃，很少在高温时形成。Krainov(2008)建立了辉锑矿在低温下形成的两个模型，含氧模型最佳反应温度为 50 ℃，在 pH<7 时，生成辉锑矿的反应为：$2HSbO_2+3H_2S=Sb_2S_3+4H_2O$，反应过程中伴随有碳酸盐水溶液的脱气和 PCO_2 的降低(至 10～34 bar)；含硫模型最佳反应温度约为 100 ℃，在低温时该模型无效，这个模型的反应方程为：$HSb_2S^{4-}+H^+=Sb_2S_3+H_2S$，$Sb_2S_4^{2-}+2H^+=Sb_2S_3+H_2S$，$H^+$的浓度对该反应影响较大。成矿流体从碳酸盐岩流向沉积碎屑岩可能伴随着 pH 值向中性水平变化，从而促使辉锑矿沉淀，因此沉积碎屑岩和碳酸盐岩界面(简称硅钙面)是有利于锑成矿的地球化学界面。

3.2　控矿因素分析

根据上文辉锑矿沉淀机制分析的基础上，结合野外勘查认识，笔者认为矿集区锑矿受多级次构造和地层岩性双重控制，现对其进行简要分析总结。

西秦岭地区锑矿分布与区域上合作–宕昌–两当深大断裂关系密切(矿集区称为宕昌–西和断裂)，为秦岭早中生代板块俯冲带的接合部位。该断裂带控制了多个锑金矿集区，包括夏河–合作金锑矿集区、宕昌–西和锑(金)矿集区、西成铅锌矿集区等空间分布。区域上 95% 的锑矿床均分布于深大断裂边部 5 km 范围内，仅有个别锑矿床距深大断裂达 10 km，显示锑成矿与深大断裂关系密切(郑明泓等，2021；李阳等，2024)。矿集区内与深大断裂平行分布的次级断裂构造是重要的控矿和储矿构造，严格控制矿体的规模、形态和产状。多数锑矿床(锑)受 NWW 和 NW 向断

裂破碎带、层间断裂以及节理裂隙控制，表现出逐级控矿的特点；部分锑矿体产于 NWW 和 NW 向褶皱的翼部，少数产于核部。富矿体多出现于构造交汇及拐弯处，构造继承性复活伴随多期次热液作用，对矿化起着富集的作用。由于矿体规模受控于储矿空间，沿走向和倾向变化较大，具有膨缩、分枝复合、尖灭再现等特征。

西秦岭地区锑矿主要赋矿于三叠系，其次为泥盆系，岩性主要为碳酸盐岩和细碎屑岩。往往都有一定的岩石组合，泥质岩石常常形成锑矿的顶板隔(遮)挡层，并且有的出现含碳质的岩石。由于碳酸盐岩化学性质活泼，形成了矿液沉淀的良好环境，出露于灰岩上部的板岩起到隔挡作用，使矿液有着充裕时间进行交代和充填；钙质砂岩是有利的储矿层位，不仅易于形成断裂裂隙，而且含有的碳酸盐成分易于流体交换沉淀成矿。锑矿一般与岩浆岩关系不密切，只有个别锑矿体赋存于岩体破碎带中。

4 成矿预测

4.1 矿集区综合勘查模型

近年来，研究区锑矿勘查取得了重要进展，新发现了白杨坝、将台、瓦石沟、赵家湾等大中型锑矿产地，显示区内找矿潜力巨大，但目前区内整体锑矿勘查和综合研究程度偏低。区内锑矿床(点)20 余处(其中 7 处为大、中型锑矿床)，本次对区内已发现的 11 个锑矿床(小型及以上)进行分类研究，采用“三位一体”找矿预测方法分析(叶天竺，2014)，对找矿必须具备要素划定为必要要素，对找矿具有重要指示作用的要素划定为重要要素，对于多数锑矿床具有共性的特征作为次要要素。经过分析总结，构造背景、成因类型和控矿构造为必要要素，赋矿地层和岩性、蚀变特征和化探异常特征为重要找矿标志的重要要素，矿物组合、矿石结构构造、矿石类型、物探及遥感异常等是次要要素。建立了符合研究区的锑矿综合勘查模型，用于服务矿集区锑矿勘查工作，助推锑矿找矿突破工作(表 1)。

4.2 成矿预测

通过对矿集区 1∶5 万成果资料全面收集整理后，显示该区域主要依靠化探工作进行找矿勘查，采用常规化探数据处理方法圈定的化探综合异常和主要锑单元素异常均已进行了系统查证，已发现锑矿 20 余处，取得重要找矿突破。如何快速识别确定有利的成矿地段和找矿靶区，支撑开拓找矿新区，是需要解决的重要技术问题。通过使用中心对数比(clr)变换方法，使用变量的几何平均值作为参照，将成分数据打开数据变换方法，有效保留更多原始信息；利用奇异性成矿理论原理基础，进行局部奇异性分析(成秋明，2011)，提取每一种元素的异常信息，数据算法处理中对高强异常进行压制保留、对低缓异常进行增强。本次收集研究区的 1∶5 万、1∶20 万的水系沉积物测量数据，对 16 种元素(Ag、As、Au、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mo、Ni、Pb、Sb、Sn、W 和 Zn)进行处理，运用主成分分析确定成矿作用指示元素组合，元素 Sb 与元素 Au、As 以及 Hg 均呈现正相关性，Sb 在第一主成分上的载荷比在第二主成分上载荷大，故选择第一主成分作为锑成矿作用的指示因子；根据双标图显示的元素与主成分间的关系，成矿元素 Sb 等在第一主成分上为正载荷，所以得分值越大，代表与成矿作用关联性越强；通过主成分得分的局部奇异性分析，结果显示高值局部奇异性指数与已知矿床点具有很好的空间对应关系，圈定的异常区与已发现锑矿床高度吻合，并新圈定找矿靶区 9 处(图 10)。通过对圈定的靶区择优开展查证，使用 1∶1 万土壤测量、激电中梯剖面、槽探等手段发现锑矿化带，部署钻探工程进行验证，新发现了将台、白杨坝、庙沟、王家湾等锑矿床。目前正在对锑矿集区其他靶区进行查证。矿集区内成矿条件优越，已取得显著找矿成效，进一步找矿潜力巨大，需要持续加强区内金锑矿勘查工作，力争取得金锑矿找矿新突破。

5 结论

(1)矿集区内的锑矿床一般发育多条平行锑矿化带，矿体在水平方向和垂向均具有尖灭再现的特征。矿集区内具有独立锑矿床、独立金矿床，亦分布有金锑共伴生矿床，显示矿集区内具有优越锑金矿资源找矿潜力。

(2)矿集区锑矿成矿主要受控于断裂构造，宕昌–西和深大断裂(区域上称为合作–宕昌–两当深大断裂)控制着矿集区和矿床的分布，次级断裂构造和褶皱是主要的储矿构造。地层对锑成矿起到重要作用，其中粉砂质–泥质岩石是有利的封闭层，含钙质砂岩是有利的储矿层。

表 1　宕昌–西和地区锑矿综合勘查模型

Tab. 1　Comprehensive exploration model of antimony deposit in Tanchang-Xihe area

模型要素		描述内容	要素分类
成矿地质环境及成矿作用	构造背景	合作–宕昌–两当深大断裂带控制着矿集区和矿床的分布，在深大断裂带的1～10 km范围内成矿	必要
	成因类型	浅成中–低温热液充填交代型矿床	必要
	控矿构造	NW向和NWW向断裂和裂隙控制着锑矿的位置，层间断裂带和褶皱控制矿体的分布	必要
	赋矿地层	深大断裂南侧三叠系是主要赋矿层位，少量分布于深大断裂北侧的泥盆系中	重要
	岩性建造	碳酸盐岩和细碎屑岩，其中粉砂质–泥质岩石是有利的封闭层；含钙质砂岩是有利的储矿层位，不仅易于形成断裂裂隙，而且碳酸盐岩化学活泼性易于流体交换沉淀成矿	重要
矿床地质特征	矿物组合	金属矿物主要为辉锑矿，以及少量的黄铁矿、辰砂等；非金属矿物主要有方解石、石英、萤石、高岭土等	次要
	矿石结构	主要有自形–半自形柱状结构、他形粒状结构、交代残余结构、压碎结构等	次要
	矿石构造	主要有浸染状、角砾状、晶簇状、放射状、团块状、脉状–网脉状、条带状构造等	次要
	矿石类型	单一辉锑矿石	次要
	蚀变特征	主要发育硅化、碳酸盐化、萤石化、黄铁矿化等。硅化多见于碎屑岩，碳酸盐化多见于碳酸盐岩中，有时两者同时发育	重要
	氧化作用	地表露头具有铁帽特征，发育锑华、黄锑华、褐铁矿、高岭土等	次要
物化探遥异常特征	磁法	部分矿区分布局部航磁异常高值，推测深部可能分布隐伏岩体	次要
	化探	主要以Sb、Hg、As、Au等异常为主	重要
	遥感	多个环形构造重叠或交叉的边部、多组线性构造的交叉部位，铁氧化物或蚀变矿物发育的部位是寻找锑矿(化)的间接找矿标志	次要

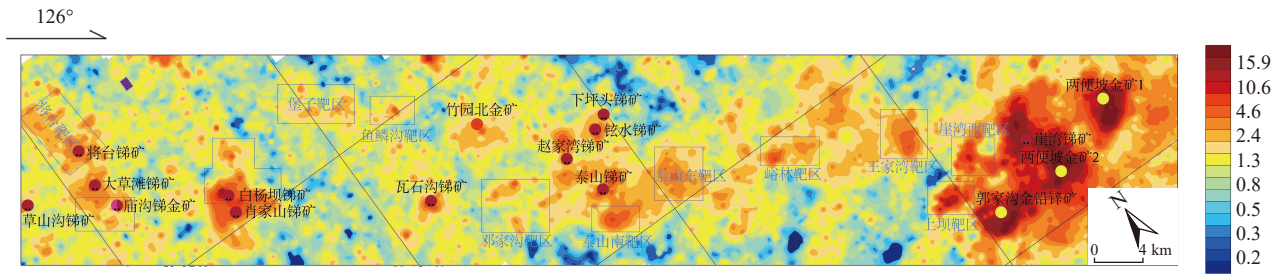


图10　宕昌–西和锑矿矿集区找矿预测及找矿靶区分布图

Fig. 10　Prospecting prediction map of the Tanchang-Xihe Antimony Ore Cluster

(3)通过总结典型矿床勘查成果，建立了矿集区锑矿综合勘查模型；开展成矿预测研究，圈定找矿靶区 9 处，其中白杨坝、将台、王家湾、庙山等 4 个靶区查证已新发锑矿点。显示矿集区内金锑找矿潜力巨

大，建议进一步加大矿集区勘查工作部署。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献（References）：

成秋明. 地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别[J]. 地球科学, 2011, 36(2): 307−316.

CHENG Qiuming. Singularity Modeling of Geo-Anomalies and Recognition of Anomalies Caused by Buried Sources[J]. Earth Science, 2011, 36(2): 307−316.

丁建华, 杨毅恒, 邓凡. 中国锑矿资源潜力及成矿预测[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 846−858.

DING Jianhua, YANG Yiheng, DENG Fan. Resource potential and metallogenic prediction of antimony deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 846−858.

丁仨平, 梁明宏, 肖林, 等. 中国区域地质志·甘肃卷 [M]. 北京: 地质出版社, 2023.

DING Sanping, LIANG Minghong, XIAO Lin, et al. Regional Geology of China: Gansu Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese),2023.

董延涛, 袁博, 牛颖超. 我国锑矿资源产业高质量发展研究[J]. 现代矿业, 2020, 36(10): 1−7.

DONG Yantao, YUAN Bo, NIU Yinchao. Research on high-quality development of antimony ore resources industry in China[J]. Modern Mining, 2020, 36(10): 1−7.

杜泽忠, 顾雪祥, 李关清, 等. 藏南拉木由塔锑 (金) 矿床成矿流体特征及成矿机制初探[J]. 现代地质, 2013, 27(2): 294−302.

DU Zezhong, GU Xuexiang, LI Guanqing, et al. The characteristics of ore-forming fluids and primary metallogenic mechanism of the Lamuyouta Sb (Au) deposit, South Tibet[J]. Geoscience, 2013, 27(2): 294−302.

洪百雄, 刘伟. 甘肃宕昌县大草滩锑矿地质特征及找矿标志[J]. 甘肃科技, 2009, 25(19): 1−3.

HONG Baixiong, LIU Wei. Geological characteristics and prospecting criteria of Dacaotan antimony deposit in Danchang County, Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(19): 1−3.

洪百雄. 甘肃礼县泰山锑矿地质特征及矿床成因探讨[J]. 甘肃科技, 2010, 26(7): 1−4.

HONG Baixiong. Geological characteristics and genesis of Taishan antimony deposit in Lixian County, Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(7): 1−4.

胡阿香, 彭建堂. 湖南渣滓溪锑钨矿床流体包裹体特征及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(3): 431−446.

HU Axiang, PENG Jiantang. Characteristics and significance of the fluid inclusions from the Zhazixi Sb-W deposit, Hunan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(3): 431−446.

姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 等. 西秦岭成矿带古生界控矿特征及有关成矿作用[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 218−228.

JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Ore-Controlling Features and Related Mineralization Functiones of the Paleozoic in West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 218−228.

李康宁, 汤庆艳, 栾晓刚, 等. 西秦岭三叠纪大河坝组砂岩构造背景与物质来源[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 113−127.

LI Kangning, TANG Qingyan, LUAN Xiaogang, et al. Tectonic Setting and Provenance of Sandstones from Triassic Daheba Formation in the West Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 113−127.

李阳, 宋扬, 唐菊兴, 等. 西藏锑矿分布, 类型及其成矿规律研究[J]. 中国地质, 2024, 51(5): 1570−1600.

LI Yang, SONG Yang, TANG Juxing, et al. Distribution, types and metallogenic regularity of antimony deposits in Tibet[J]. Geology in China, 2024, 51(5): 1570−1600.

刘永胜, 罗先熔, 曹佰迪, 等. 甘肃省礼县三峪地区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 340−351.

LIU Yongsheng, LUO Xianrong, CAO Baidi, et al. Soil Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction in Sanyu Area, Li County, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 340−351.

吕宏伟, 徐磊, 徐晓明, 等. 陕西省丹凤县庾岭锑矿的发现及找矿意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 339−353.

LYU Hongwei, XU Lei, XU Xiaoming, et al. The Discovery of Antimony Deposit in Yuling, Danfeng County, Shaanxi Province and Its Prospecting Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 339−353.

彭德启, 牛洪斌. 甘肃省的汞锑矿分布规律及找矿[J]. 甘肃地质, 2008, 17(1): 1−6.

PENG Deqi, NIU Hongbing. Distribution law and prospecting of mercury-antimony deposits in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2008, 17(1): 1−6.

彭建堂, 胡瑞忠, 邓海琳, 等. 湘中锡矿山锑矿床的 Sr 同位素地球化学[J]. 地球化学, 2001, 30(3): 248−256.

PENG Jiantang, HU Ruizhong, DENG Hailing, et al. Strontium isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan[J]. Geochimica, 2001, 30(3): 248−256.

孙晓明, 莫儒伟, 翟伟, 等. 藏南沙拉岗锑矿流体包裹体红外显微测温研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 189−198.

SUN Xiaoming, MO Ruwei, ZHAI Wei, et al. Infrared fluid inclu-

sion microthermometry on stibnite from Shalagang antimony ore in southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 189−198.

王永磊, 陈毓川, 王登红, 等. 中国锑矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1366−1378.

WANG Yonglei, CHEN Yuchuan, WANG Denghong, et al. Discussion on main ore concentration areas and resource potential of antimony deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1366−1378.

叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 勘查区找矿预测理论与方法·总论[M]. 北京: 地质出版社, 2014.

YE Tianzhu, LU Zhicheng, PANG Zhengshan, et al. Theory and method of prospecting prediction in exploration area: A general introduction[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese),2014.

张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 1−10.

ZHANG Guowei, GUO Anlin, YAO Anping. The West Qinling-Songpan continental tectonic node in the tectonics of mainland China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 1−10.

张会琼, 薛陈利, 熊靓辉, 等. 中国锑产业发展与挑战[J]. 矿产勘查, 2024, 15(7): 1318−1324.

ZHANG Huiqiong, XUE Chenli, XIONG Lianghui, et al. Development and challenges of China's antimony industry[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(7): 1318−1324.

张新虎, 梁明宏, 刘建宏, 等. 甘肃省区域地质矿产研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2014.

赵圣涛, 毛世德, 张文高, 等. 辉锑矿在热液中的溶解度与沉淀机制: 来自热力学计算的约束[J]. 地球化学, 2025, 54(3): 379−389.

ZHAO Shengtao, MAO Shide, ZHANG Wengao, et al. Stibnite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: Constraints from thermodynamic modeling[J]. Geochimica, 2025, 54(3): 379−389.

郑明泓, 蔡国盛, 陈兴龙, 等. 贵州独山锑矿田石英 Rb-Sr 定年及矿床地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 215−227.

ZHENG Minghong, CAI Guosheng, CHENG Xinglong, et al. The Rb-Sr dating of quartz and geochemistry studying of the Dushan antimony ore-field, Guizhou, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(1): 215−227.

Krainov S R, Ryzhenko B N, Cherkasova E V. Geochemical evolution of Sb migration species in carbonate and thermal waters in relation to Sb hydrogenic mineralization[J]. Geochemistry International, 2008, 46(3): 233−259.

Naumov V B, Dorofeeva V A, Mironova O F. Physicochemical parameters of the origin of hydrothermal mineral deposits: Evidence from fluid inclusions. V. Antimony, arsenic, and mercury deposits[J]. Geochemistry International, 2018, 56(9): 901−914.

Olsen N J, Mountain B W, Seward T M. Antimony(Ⅲ) speciation in hydrosulfide solutions from 70 to 400 ℃ and up to 300 bar[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2019, 3(6): 1058−1072.

Pavlova G, Gushchina L, Borovikov A, et al. Forming conditions for Au-Sb and Ag-Sb ore according to thermodynamic modeling data[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(5): 1557−1562.