

doi: 10.11720/wtyht.2019.1344

万卫,陈振亚,程志中,等.CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区隐伏矿勘查的试验研究[J].物探与化探,2019,43(1):70-76.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1344

Wan W, Chen Z Y, Cheng Z Z, et al. Pilot study of CO₂ gas measurement method for mineral exploration in hilly areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 70-76. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1344

CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区 隐伏矿勘查的试验研究

万卫^{1,2,3}, 陈振亚⁴, 程志中³, 潘含江⁵, 秦欢欢¹, 赖冬蓉¹

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 300013; 2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 300013; 3. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037; 4. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第一区域地质调查大队, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为了研究 CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区隐伏矿勘查的应用效果, 采用改进的 CO₂ 快速分析仪分别对湖南黄金洞金矿区金枚矿段和梨树坪矿段进行了 CO₂ 气体测量试验性研究和面积性测量研究。结果表明, CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区能够发现深部隐伏矿和构造信息, 并为梨树坪矿段圈定了 3 个找矿靶区, 具有重要的实际意义, 为我国覆盖区隐伏矿勘查突破积累了数据和经验。

关键词: 气体测量; 二氧化碳; 低山丘陵区; 隐伏矿

中图分类号: P593

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)01-0070-07

0 引言

随着近几十年我国矿产地质勘查程度的加深和地质找矿工作的不断深入, 地表矿产资源的开发前景不容乐观, 已发现矿产资源量的开发几近枯竭, 我国的金属矿产地质勘查已经逐步进入了寻找隐伏矿、盲矿和难识别矿产的攻深找盲阶段, 找矿难度越来越大。在新的一轮找矿勘查工作中, 要想取得更大的突破, 必须加强覆盖区地球化学勘查技术的研究。气体地球化学测量方法由于其强穿透性和垂直向上迁移的机制, 且在覆盖区能够快速发现找矿信息, 圈定断裂构造和矿化体, 被认为是覆盖区找矿有前景的地球化学勘查方法之一, 受到勘查地球化学界的重视。

当前, 气体地球化学测量方法的常用指标有汞

气、CO₂、SO₂、H₂S、Rn、CH₄、He 和有机烃气等^[1-10], 其中汞气测量方法研究最为系统, 并在覆盖区地质找矿工作中发挥了很大的作用, 在国内外隐伏矿勘查和断裂识别工作中取得了不错的效果^[11-16]。CO₂ 作为 20 世纪 80 年代以后开发的气体地球化学测量指标, 在国内外矿产地质勘查中也取得了一定的效果, 1983 年 Lovell 等在干旱—半干旱区隐伏矿上方观察到了清晰的 CO₂ 异常^[17]; Hinkle 等于 1984 年在美国图森斑岩型铜矿上方观察到了强烈的 CO₂ 异常^[18]; 1986 年刘庆余在某金、铀床上使用快速滴定管进行了 CO₂ 测量实验, 取得了明显的地质效果^[19]; 1986 年高乾兰在多个地区野外工作中发现 CO₂ 测量可适用于勘探阶段的晚期, 能快速获得有关寻找已知矿体的信息^[20]; Polito 等于 2002 年通过便携式快速分析仪对造山带金矿床进行了 CO₂ 测量方法的研究, 结果表明 CO₂ 异常范围与深部矿化

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2018-11-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113086000); 东华理工大学博士科研启动基金(DHBK2017107)和核资源与环境国家重点实验室开放基金(NRE1808)

作者简介: 万卫(1989-), 男, 讲师, 2017年毕业于中国地质大学(北京)地球化学专业, 获博士学位。Email: 631178404@qq.com

通讯作者: 陈振亚(1986-), 男, 工程师, 2014年毕业于中国地质大学(北京)地球化学专业, 获硕士学位。Email: 619534449@qq.com

位置相一致^[21];2006 年张洁等采用气体快速分析仪对草原覆盖区和南方红壤区隐伏矿床开展了 CO₂ 测量试验性研究,结果表明 CO₂ 测量方法能有效发现深部盲矿的信息^[22]。尽管 CO₂ 测量方法在国内外地质找矿工作取得一些成功的经验,但是其发展前景也遇到了一些阻碍,测量仪器低效、测试精度不够、测试材料昂贵和测试时间长等均不符合当前地质勘查工作的发展需要。对于 CO₂ 测量而言迫切需要一种高灵敏度、快速、经济、省时和高效的测量测试分析方法。

目前,由于我国测试技术的加速发展,气体测量技术也取得了很大的进步。通过红外吸收光谱法检测 CO₂,方法检出限可达到 1×10^{-6} ,能够帮助地质工作者发现土壤中低含量的 CO₂。本次研究使用改进的 CO₂ 快速分析分析仪对低山丘陵区湖南黄金洞金矿典型剖面进行 CO₂ 气体测量方法试验,探讨 CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区隐伏矿勘查的有效性,然后在黄金洞梨树坪矿段未知区开展 1:2 万面积性 CO₂ 气体测量,通过解释气体异常,圈定找矿靶区,为我国覆盖区气体地球化学勘查技术突破积累经验 and 数据。

1 CO₂ 气体测量方法原理

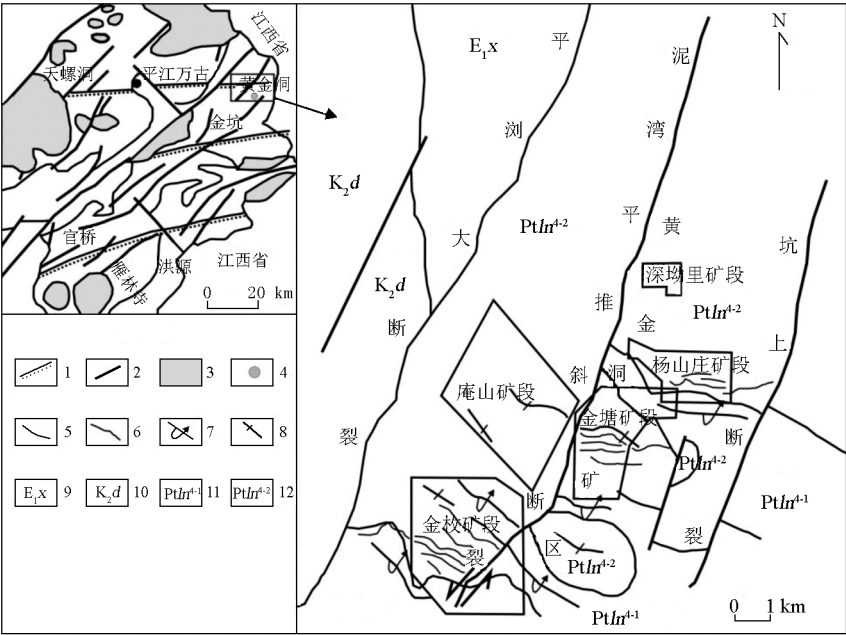
本次研究采用红外吸收光谱法对 CO₂ 进行检测,CO₂ 的特征吸收峰一般为 4.26 μm。红外光谱定量分析是以朗伯—比尔定律为基础的。待测气体可以直接吸收光源发射的单色红外光,因此 CO₂ 气体的浓度可以通过直接测定吸光度获得。单色红外光(波长 4.26 μm)通过两个气室,一个是测量气室,里面充以不断流过的被测气体,另一个参比气室,里面充以无吸收性质的背景气体。仪器工作时,红外光源发出的红外光通过窗口特殊材料入射到测量气室,测量气室由抽气泵连续吸入待测 CO₂ 气体,CO₂ 气体能够吸收波长为 4.26 μm 的红外光。当测量气室待测气体浓度发生明显变化时,其吸收的红外光量也会发生相应的变化,而基准光束(参比气室光束)的光量保持不变。从两个气室出来的光量差一通过检测器,检测器就将产生明显的压力差,并转化为电容检测器的电信号。电信号经信号调节电路放大处理后,送往显示器以及总控的 CRT 显示器上。此输出信号的大小与待测组分的浓度成正比,从而能够获得 CO₂ 的浓度数据^[22]。

2 研究区地质地理概况

湖南黄金洞金矿地处湖南东北部平江县内,是湖南省 4 大黄金生产基地之一。研究区为冷家溪群地层组成的构造剥蚀低山丘陵地形^[23],最高为矿区东部的山尖峰,其标高为 694.45 m,最低位于矿区北西角樟树潭冲积平原,其标高 119.80 m,二者高差 574.65 m,总地势东高西低。区内地形切割厉害,沟谷发育,切割深度大于 150 m。第四系较为发育,第四系沉积物主要为残坡积层及冲积层,主要成分为黏土、砂土及岩屑等,覆盖层最薄的地方有 2 m,最厚的剖面达 20 m。研究区属亚热带季风性气候,温暖潮湿,雨量充沛,年平均气温 16.8℃,年平均降雨量 1 532.5 mm,年平均蒸发量 1 268.7 mm,雨量集中于每年 4~7 月,日最大降水量达 223.9 mm。

黄金洞金矿区位居扬子板块东南缘,隶属江南古陆造山带中段,处于扬子板块与华南板块的会聚碰撞带上。矿区内主要出露地层为元古宇冷家溪群第三岩组和第四岩组(图 1)。区内构造较为发育,主要构造为 NWW 向倒转复式背向斜构造,沿其轴向方向成群分布着一系列 EW 向、NNW 向、SEE 向挤压破碎带,控制着研究区内金矿的空间规模和分布。区内岩浆活动强烈,且呈多期多阶段,主要有雪峰期、加里东期、印支期和燕山早期中酸性侵入岩,加里东期岩浆活动提供了本区金成矿的主要岩浆热液来源,研究区金成矿与燕山期岩浆热液活动密切相关。岩浆岩在矿区及外围很少出露,均被第四系冲洪积物覆盖。围岩蚀变强烈,主要发育硅化、毒砂化、黄铁矿化、方解石化和绿泥石化等。金矿化与黄铁矿化、毒砂化、硅化密切相关,这些围岩蚀变对金矿体的形成与富集起到关键作用,方解石化、绿泥石化与金成矿基本无关^[24-25]。

黄金洞金矿矿体主要产于中元古界冷家溪群浅变质碎屑岩中,受层位控制明显。矿体控制长度大概为 30~1 000 m,沿倾向延伸约为 20~1 240 m,矿体呈似层状、脉状形态为主,具分支复合,尖灭再现特点。主要矿石类型为含金石英脉型、含金蚀变板岩型和含金蚀变碎裂板岩型矿石。主要金属矿物成分为毒砂和黄铁矿,其次为方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等,脉石矿物以石英为主,绢云母、方解石、白云石、绿泥石等次之^[26-27]。矿体多被第四系冲洪积物覆盖,且覆盖层组分均一,适合开展气体地球化学测量方法的研究。



1—韧性推覆剪切带;2—断裂;3—花岗岩;4—金矿床;5—地质界线;6—矿脉;7—倒转向斜;8—倒转背斜;9—古近系新余组;10—白垩系上统戴家坪组;11—冷家溪群第四岩性第一岩组;12—冷家溪群第四岩性第二岩组
1—ductile nappe shear zone; 2—fracture; 3—granite; 4—gold deposit; 5—geological boundary; 6—ore vein; 7—reversed syncline; 8—reversed anticline; 9—Paleogene Xinyu formation; 10—Upper Cretaceous Daijiaping formation; 11—1st petrofabric of the 4th lithological member of Lengjiayi group; 12—2nd petrofabric of the 4th lithological member of Lengjiayi group

图 1 黄金洞金矿区地质图(改编自参考文献[28])

Fig.1 The geological map of Huangjindong mining area(adopted from a bibliography[28])

3 采样方法和分析方法

在预设定点位上用铲子清除 10~15 cm 厚的表层有机质和土壤后,用铁锤将钢钎打入疏松覆盖层

内 0.6~0.7 m,拔出钢钎后立即将螺旋采样器旋入孔内 0.4~0.5 m 深处,用硅胶管依次将螺旋采样器、干燥器、过滤器和 CO₂ 快速分析仪连接好,抽气前检查是否漏气,然后开启仪器,通过抽气泵抽取气体(图 2)。仪器开始对 CO₂ 进行测量后,CO₂ 的测试

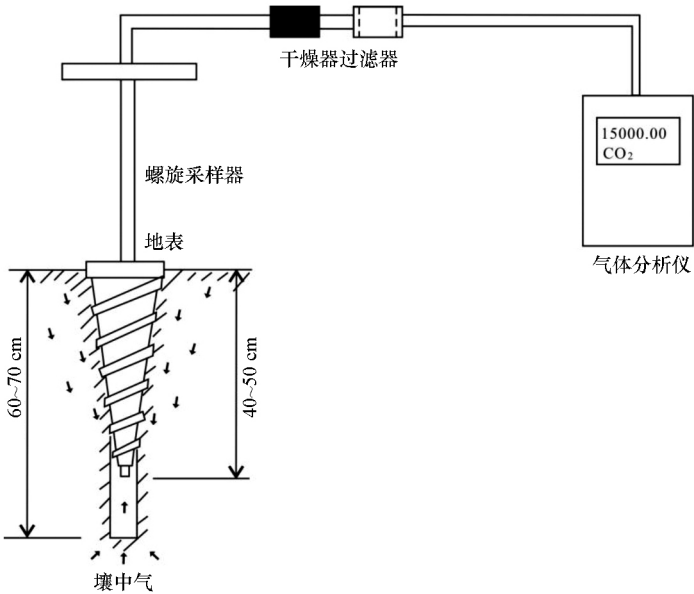


图 2 气体测量装置结构

Fig.2 Schematic of the device for gas measurement

计数会逐渐增加,当仪器测试计数达到最大值后计数会逐渐减少,最大值即为该测试点的实际测量值,测量时间一般为 30~60 s,现场读取测量数据。CO₂ 测量仪器型号为 JFQ-3150E,分析检测限能达到 1×10^{-6} ,能够应用于覆盖区隐伏矿地球化学勘查。CO₂ 气体测量过程中要详细记录采样深度、疏松沉积物特征、植被状况等条件。每天还需记录开始工作时间,早、中、晚的天气状况,0.5 m 处的地温和湿度。

4 测量方法试验研究

4.1 重现性试验

为了验证 CO₂ 气体测量方法的重现性,本次研究对黄金洞矿区梨树坪矿段 11 号线相同的采样点进行了 CO₂ 重复性测量试验,时间相差一个月。从测量结果来看(图 3),不同时间测量结果一致性较好,不仅 CO₂ 含量分布趋势一致,而且含量也非常接近,CO₂ 异常峰值对应性也较好,证明了 CO₂ 气体测量方法具有一定的重现性。

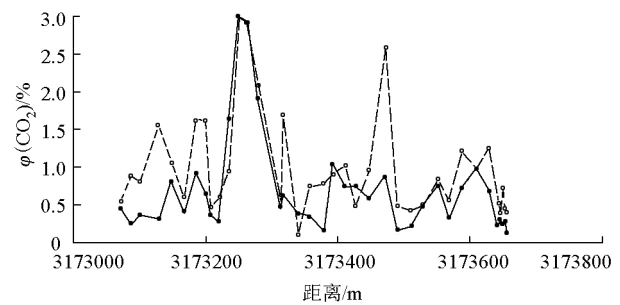


图 3 黄金洞矿区梨树坪矿段 11 号线 CO₂ 重复性测量结果
Fig.3 Distribution of repeated measurement results of CO₂ in soil gases along No.11 line at Lishuping ore block

4.2 已知矿段有效性试验

为了探讨 CO₂ 气体测量方法在黄金洞矿区的应用效果,根据试验区地形及控矿地质条件,在已知矿(化)体上方,采用剖面测量方法进行试验研究。通过已知矿体上方气体异常分布特征研究,了解 CO₂ 气体测量方法在覆盖区矿产勘查的优越性和有效性,为面积性气体测量结果解释提供依据。

本次试验研究选择黄金洞矿区金枚矿段 36 线(107 号脉)作为典型剖面,剖面试验段已完钻 2 孔,矿体埋深 0~300 m,测线穿越矿脉并适度延长至背景区。该矿脉位于金枚矿段的最南部,矿脉出露走向长达 1 200 m,走向 NW,倾向 NE,倾角变化在 23°~88°之间,一般为 40°~60°(图 4),向深部产状逐渐变缓,破碎带发育且有厚度不一的蚀变带,金矿脉主

要赋存于破碎带和蚀变带内。试验剖面走向 NE,测量路线由 NE 到 SW。测线长度 700 m,点距 20 m,现场读取测量指标 CO₂ 在金矿脉上方的含量变化,共计 35 个测量点。

试验结果显示(图 4),CO₂ 在已经矿体上方有异常显示,沿着矿体倾向方向 CO₂ 异常范围较宽,异常位置基本与矿体空间位置吻合,且在 300 m 深的矿体上方依然有落异常显示,说明了 CO₂ 测量方法能够完全反应矿化体的特征,且具有较大的探测深度,可以作为寻找盲矿体的有效指标,CO₂ 测量方法可为本区进一步的隐伏矿勘查提供服务。

5 测试方法实例应用

在试验结果的基础上,对梨树坪矿段进行 CO₂ 气体面积性测量研究。黄金洞矿区梨树坪矿段为一未知区,前人在区内东南部开展的地质勘查工作主要有槽探、剥土,发现两条断裂破碎带,推测走向 NWW,倾角 40°,延伸长度推测 2 km。区内东北部有小的石英脉发育。由于土壤覆盖厚度达 1~5 m,常规的地质找矿方法在试验区效果不理想,未能完全提取本区的地球化学异常信息。

梨树坪矿段设计试验区面积 4 km²,布置 11 条勘探线,其中勘探线间距 200~300 m,点距 10~30 m;在异常区适当加密到 10 m,背景区点距放宽到 30 m。试验区共完成数据点 698 个。野外工作过程中记录当天天气、气温、地表植被种类、土壤类型和土壤干湿程度,为后期数据分析过程中提供异常解释的依据。

5.1 气体含量特征

梨树坪矿段 CO₂ 面积性测量结果参数统计见表 1,由表中可以看出,梨树坪矿段土壤中 CO₂ 含量最大值为 5.53%,最小值为 0.01%,平均值为 0.58%。CO₂ 含量变异系数大于 1,说明 CO₂ 的含量变化范围较大,且存在较为明显的 CO₂ 异常,可能与区内存在断裂破碎带和金矿化有关。

表 1 黄金洞矿区梨树坪矿段 CO₂ 面积测量结果统计参数
Table 1 Statistical parameters of CO₂ area measurement results at Lishuping ore block

参数	数值
最大值/%	5.53
最小值/%	0.01
极值比	553
平均值/%	0.58
背景值/%	0.5
标准差	0.6
变异系数	1.03

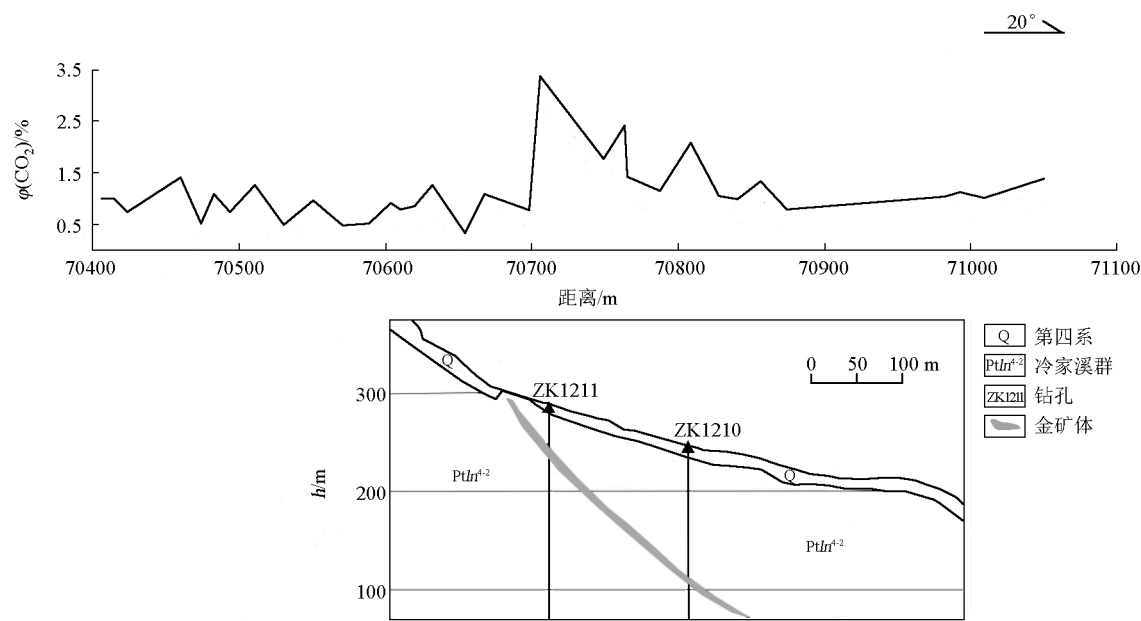


图 4 黄金洞矿区金枚矿段 36 线 CO₂ 测量剖面

Fig.4 Distribution of CO₂ in soil gases along No.36 line at Jinmei ore block of Huangjindong mining area

5.2 气体空间分布特征

气体测量受温度、湿度等外界条件影响较显著，由于试验区的天气状况和勘探线土壤特征等因素，造成野外采集的数据绝对值相差较大。试验区野外测得 CO₂ 含量最大值超过仪器最大量程范围的 10%，然而测得的 CO₂ 最小含量值仅为 0.01%，可知试验受到物化条件影响大。土壤中有有机质的含量也影响 CO₂ 的含量，在一些地势较低的地段，土壤中有有机质含量较低，土壤湿度较大，其 CO₂ 含量值也较高。若采用原始数据作图，数据的跳变将影响异常下限的确定，不易提取异常信息且可能漏掉不明显的异常区域。故为了消除每天外界条件不同所引起的测量系统误差，采用气体测量结果的每日衬度值作图，即每个点位 CO₂ 含量除以当日测量结果的平均值。

面积性测量结果显示(图 5)，在研究区内，发现 CO₂ 衬值异常 5 处，异常形态多为椭圆型，长 150~700 m，宽 100~300 m，长轴方向呈 NW—SE 向延伸，异常总体上表现为明显的带状分布，与黄金洞矿区矿体走向分布一致。5 处异常表现为三级异常分带明显，且均具有较清晰的浓集中心。其中 4 号异常区位于探槽确定的断裂破碎带上方，为地质勘查已确定的矿体；5 号异常区与前人推测的断裂破碎带位置相吻合，虽然尚未有工程验证，但在一定程度上可能指示深部存在矿体。本次面积性测量新发现的 1 号、2 号、3 号异常位于未知区，结合黄金洞矿区矿

体分布规律和本次异常分布结果来看，1 号异常区和 3 号异常区可能指示同一条矿体，而 2 号异常区可能指示另外一条矿体。

通过对梨树坪矿段的 CO₂ 面积性测量试验，可以发现 CO₂ 测量方法对反映深部隐伏矿体和断裂构造有较好的效果，且本次圈定的 1 号、2 号、3 号和 5 号异常具有较大的找矿远景，可作为本区下一步金矿勘查的重点区域。

6 结论

1) 红外吸收光谱法能检测到土壤中极微量的 CO₂，检出限能达到 1×10^{-6} ，能够有效地发现覆盖区深部矿(化)体和构造上方的 CO₂ 异常，符合现代矿产勘查工作的需要。

2) 黄金洞矿区金枚矿段 36 线 CO₂ 测量试验和梨树坪矿矿段 CO₂ 面积性试验结果表明，CO₂ 在已经矿(化)体和断裂破碎带上方有明显的异常显示，说明 CO₂ 测量方法对低山丘陵区隐伏矿勘查是有效的，可为该区进一步深部找矿突破提供服务。

3) 对黄金洞金矿区梨树坪矿段开展的 CO₂ 气体面积性测量，共圈定了 1 号、2 号、3 号和 5 号共 4 处找矿靶区，可作为研究区下一步地质勘查的重点区域。

4) CO₂ 测量方法具有快速、探测深度大的特点，能在野外直接读数，能对覆盖区进行快速评价，

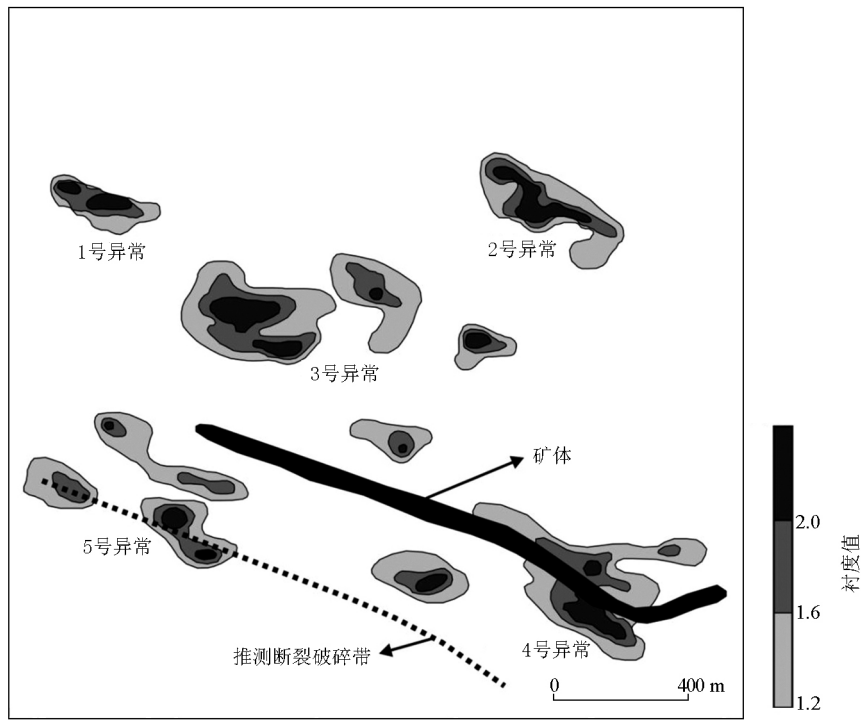


图 5 黄金洞矿区梨树坪矿段 CO₂ 气体测量异常

Fig.5 Anomalous map of CO₂ in soil gases at Lishuping ore block of Huangjindong mining area

减小工作周期,与其他勘查地球化学、地球物理方法及地质方法配合使用,可第一时间提供有效的找矿信息。

参考文献 (References):

[1] 陈远荣,庄晓蕊. 金属矿床有机烃气常见异常模式和成因机理研究[J]. 矿产与地质, 2001, 15(6): 738-742.
Chen Y R, Zhuan X R. The common anomaly pattern of organic hydrocarbon of metallic ore deposit and its mechanism study[J]. Mineral Resources and Geology, 2001, 15(6): 738-742.

[2] Duchscherer J W. Geochemical hydrocarbon exploration-a new/old exploration tool[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1983, 19(2): 335-336.

[3] 崔熙琳,汪明启,唐金荣. 金属矿气体地球化学测量技术新进展[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 135-139.
Cui X L, Wang M Q, Tang J R. New advances in gas geochemical exploration for metallic ore deposits[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(2): 135-139.

[4] Hinkle M E, Ryder J L, Sutley S J, Botinelly T. Production of sulfur gases and carbon dioxide by synthetic weathering of crushed drill cores from the Santa Cruz porphyry copper deposit near Casa Grande, Pinal County, Arizona[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 38: 43-67.

[5] Butt, C R M, Gole M J. Helium in soil and over burden gas as an exploration pathfinder; An assessment [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1985(3), 24: 141-173.

[6] Hale M. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2010, 10(2): 261-267.

[7] McCarthy J H. Mercury vapor and other volatile components in the air as guides to ore deposits [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1972, 1(3): 143-162.

[8] 韩伟,刘华忠,王成文,等. 沙泉子铜镍矿壤中汞气和二氧化硫气体地球化学测量[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1077-1081.
Han W, Liu H Z, Wang C W, et al. A preliminary test of SO₂ and Hg in soil gas geochemical exploration in the Shaquanzi Cu-Ni deposit[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1077-1081.

[9] 尹冰川. 综合气体地球化学测量[J]. 物探与化探, 1997, 21(4): 241-246.
Yin B C. Integrated geochemical gas survey[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1997, 21(4): 241-246.

[10] Lombardi S, Voltattorni N. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults [J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(4): 1206-1220.

[11] Fursov V Z. Mercury vapor surveys: technique and results [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 38(5), 145-155.

[12] You Y F, Li X J. Research and application of soil-gas mercury surveys for locating deep uranium orebodies [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 38(2): 133-143.

[13] 申勇胜,马小红,张玉洁,等. 青海省化隆县拉水峡铜镍矿区地气汞气测量异常特征分析[J]. 物探与化探, 2009, 17(4): 54-57.
Shen Y S, Ma X H, Zhang Y J, et al. Discussion on the anomaly characteristics of Lashuixia Cu-Ni deposit in Qinghai by geogas and mercury gas measurement[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 17(4): 54-57.

[14] 李伟,刘翠辉,贺根文,等. 赣南银坑矿田土壤与汞气地球化学特征与成矿预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6):

- 1195-1202.
- Li W, Liu C H, He G W, et al. Geochemical anomalies and metallogenic prediction in the Yinkeng ore field, Southern Jiangxi[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(6): 1195-1202.
- [15] 王国华, 蒋敬业, 董勇. 利用壤中汞气测量在西天山高寒山区寻找隐伏矿的研究[J]. 物探与化探, 2002, 26(5): 372-375.
- Wang G H, Jiang J Y, Dong Y. The application of soil mercury vapor survey to the prospecting for concealed ore deposits in west Tianshan high and cold mountain areas[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(5): 372-375.
- [16] 曾旭, 陈远荣, 林立保, 等. 烃汞综合气体测量法在冲洪积覆盖区找矿的可行性探讨[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 607-616.
- Zeng X, Chen Y R, Lin L B, et al. The feasibility of applying integrated hydrocarbon and mercury method to ore prospecting in alluvial coverage area[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 607-616.
- [17] Lovell J S, Hale M, Webb J S. Soil air carbon dioxide and oxygen measurements as a guide to concealed mineralization in semi-arid and arid regions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1983, 19(2): 305-317.
- [18] Hinkle M E, Dilbert C A. Gases and trace elements in soils at the North Silver Bell deposit, Pima County, Arizona[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1984, 20(3): 323-336.
- [19] 刘庆余. CO₂ 气体地球化学法在地质找矿中的应用[J]. 地质地球化学, 1988, 5(6): 11-16.
- Liu Q Y. The application of CO₂ gas measurement method for mineral exploration[J]. Geology and Geochemistry, 1988, 5(6): 11-16.
- [20] 高乾兰. 根据壤中二氧化碳和氧气探测隐伏矿体[J]. 桂林工学院学报, 1986, 4: 1-4.
- Gao Q L. Detecting concealed orebodies based on carbon dioxide and oxygen in soil air[J]. Journal of Guilin University of Technology, 1986, 4: 1-4.
- [21] Polito P A, Clarke J D A, Bone I Y, et al. A CO₂-O₂-light hydrocarbon-soil-gas anomaly above the Junction orogenic gold deposit: a potential, alternative exploration technique[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2002, 2(2): 333-344.
- [22] 张洁, 程志中, 伦知颖, 等. 土壤中 CO₂、SO₂ 和 H₂S 气体测量; 一种适用于覆盖区找矿的化探方法[J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 12-17.
- Zhang J, Cheng Z Z, Lun Z Y, et al. Soil air Carbon Dioxide, Sulphur Dioxide and Hydrogen Sulfide Measurements as a Guide to concealed mineralization[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 12-17.
- [23] 刘智振, 谷新建, 黄友金, 等. 黄金洞金矿深部找矿方向研究[J]. 采矿技术, 2016, 16(5): 79-81.
- Liu Z Z, Gu X J, Huang Y J, et al. Research on the direction of deep prospecting in Huangjindong gold deposit[J]. Mining Technology, 2016, 16(5): 79-81.
- [24] 黄强太, 夏斌, 蔡周荣, 等. 湖南省黄金洞金矿田构造与成矿规律探讨[J]. 黄金, 2010, 31(2): 9-13.
- Huang Q T, Xia B, Cai Z R, et al. Study on tectonic and metallogenic law in Huangjindong gold ore field, Hunan province[J]. Gold, 2010, 31(2): 9-13.
- [25] 夏浩东, 息朝庄, 邓会娟, 等. 湘东北黄金洞金矿床成因: 硫、铅同位素和流体包裹体新证据[J]. 黄金, 2017, 38(10): 19-24.
- Xia H D, Xi C Z, Deng H J, et al. Genesis of Huangjindong gold deposit: new evidence for sulfur, lead isotopes and fluid inclusions[J]. Gold, 2017, 38(10): 19-24.
- [26] 息朝庄, 杨涛, 夏浩东, 等. 湘东北黄金洞金矿床微量元素、稀土元素特征及其地质意义[J]. 黄金, 2018, 39(2): 17-21.
- Xi C Z, Yang T, Xia H D, et al. Characteristics of trace elements and REE in Huangjindong gold deposit in northeastern Hunan and their geological significance[J]. Gold, 2018, 39(2): 17-21.
- [27] 沈克富. 平江黄金洞金矿田成矿特征及找矿前景[J]. 湖南地质, 2000, 19(4): 237-240.
- Shen K F. The characteristics of gold mineralization and the prospecting vista in Huangjindong gold deposit in Pingjiang County, Hunan[J]. Hunan Geology, 2000, 19(4): 237-240.
- [28] 刘亮明, 彭省临, 吴延之. 湘东北地区脉型金矿床成矿构造特征及构造成矿机制[J]. 大地构造与成矿学, 1997, 3(21): 197-204.
- Liu L M, Peng X L, Wu Y Z. Features of metallogenic-tectonic sand mechanism of tectonic-metallization for vein-type gold deposits in the north-eastern Hunan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1997, 3(21): 197-204.

Pilot study of CO₂ gas measurement method for mineral exploration in hilly areas

WAN Wei^{1,2,3}, CHEN Zhen-Ya⁴, CHENG Zhi-Zhong³, PAN Han-Jiang⁵, QIN Huan-Huan¹, LAI Dong-Rong¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 300013, China; 2. Faculty of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 300013, China; 3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. No. 1 Geological Survey Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Mining, Urumqi 830011, China; 5. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: To study the effectiveness of CO₂ gas measurement method in the exploration for concealed mineral deposits in hilly areas, the authors carried out pilot study and area study by employing CO₂ gas measurement with rapid gas analytical techniques at Jinmei ore block and Lishuping ore block of Huangjindong mining area, respectively. The results indicate that CO₂ gas measurement method can discover the information around deeply buried mineral deposits and deep-seated structures. Having delineated three prospecting target areas for Lishuping ore block, it is proved to have important practical significance and can accumulate data and experience for concealed mineral exploration in covered areas.

Key words: gas measurement; carbon dioxide; hilly area; concealed deposit

(本文编辑: 蒋实)