doi:10.3799/dqkx.2011.035

便携式X射线荧光光谱技术在泥河铁矿岩心矿化蚀变信息识别中的应用

夏庆霖[1,2],成秋明[1,2,3],陆建培[2],肖 文[2],桑 浩[2],袁兆宪[2],刘 艳[2],邱俊玲[2]

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074
2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074
3. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系,M3J1P3,加拿大多伦多

摘要: 便携式X射线荧光光谱(PXRF)是针对野外原位快速分析而发展起来的一项新技术,常被用于岩石露头地球化学研究和土壤重金属污染评价等方面.本研究以安徽省泥河铁矿钻孔为例,在野外对5个钻孔的岩心系统划分岩性段,利用便携式X射线荧光光谱仪原位测量每个岩性段的Fe、Mn、Cr、Co、Ni、Ti、V、Cu、Zn、Pb、Ag、Mo、K、Ca、As、Sb、Bi、Cs、Zr、Nb等元素含量,绘制钻孔各元素含量分布图.研究发现,(1)利用PXRF技术获得的岩心Fe元素高含量部位与根据化学分析得到的铁矿石品位数据而圈定的磁铁矿体范围吻合较好;(2)Fe元素和Fe-V-Mn-Cr-Ni-Ti-Bi组合异常、Zn元素和Zn-Cu-Cd组合异常分别对铁矿化和铜、锌矿化具有较好的指示作用;(3)K、Ca异常分别对钾长石化、硬石膏化等蚀变具有较好的指示作用.由此可见,PXRF技术在野外岩心矿化和蚀变信息识别中具有方便、快捷、实用、可靠、无损、成本低廉等优点.

关键词: 便携式X射线荧光光谱;深部找矿;矿化;蚀变;泥河铁矿.

中图分类号: P618.31 **文章编号:** 1000-2383(2011)02-0336-05 **收稿日期:** 2010-12-02

Application of Portable XRF Technology to Identification of Mineralization and Alteration along Drill in the Nihe Iron Deposit, Anhui, East China

XIA Qing-lin[1,2], CHENG Qiu-ming[1,2,3], LU Jian-pei[2], XIAO Wen[2], SANG Hao[2], YUAN Zhao-xian[2], LIU Yan[2], QIU Jun-ling[2]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
3. *Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto* M3J1P3, *Canada*

Abstract: Portable X-ray fluorescence spectrum (PXRF) is a new analysis technique in-situ and is usually applied in both geochemical research at geological outcrop scale and heavy metal pollution assessment in soil. In this study, PXRF was used to recognize lithology section and to analyze the content of Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Ti, V, Cu, Zn, Pb, Ag, Mo, K, Ca, As, Sb, Bi, Cs, Zr and Nb along 5 drill holes in the Nihe iron deposit, Anhui, East China. Based on these data, the spatial distribution of these elements is obtained. The results show that (1) the areas with high values of Fe obtained by PXRF have high spatial correlation with the area with high grade of Fe delineated by chemical analysis; (2) Fe anomalies, Fe-V-Mn-Cr-Ni-Ti-Bi anomalies, Zn anomalies and Zn-Cu-Cd anomalies are good indicators for Fe mineralization, Cu and Zn mineralization, respectively; and (3) K and Ca anomalies are good indictors for potash feldspar alteration and anhydrite alteration, respectively. These results indicate that PXRF is a convenient, quick, practical, reliable, and nondestructive technique of low cost for identifying of mineralization and alteration along drill in the field.

Key words: portable X-ray fluorescence spectrum; deep mineral resources exploration; mineralization; alteration; Nihe iron deposit.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40638041);教育部创新团队基金(No. IRT0755);国家"863"高新技术项目(No. 2009AA06Z110);地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(No. GKZ10Y605).

作者介绍: 夏庆霖(1968-),男,教授,博士,主要从事矿产勘查与定量评价的教学与科研. E-mail: qlxia@cug.edu.cn

随着金属矿产深部找矿工作的开展，地球物理、地球化学和遥感新技术不断得到广泛应用，大量深度大于 1 000 m 的钻探工程得以实施. 对这些钻孔岩心矿化与蚀变现象的深入研究，既可以更好地总结矿体空间分布规律，又能对物化探数据解释提供地质依据，从而降低深部勘查的不确定性，达到进一步提高深部找矿成功率的目的. 本文尝试利用便携式 X 射线荧光光谱技术（PXRF）在野外原位快速分析泥河铁矿岩心的元素含量，结合地质观察，进行矿化与蚀变信息的识别和提取.

1　泥河铁矿基本特征

长江中下游地区是我国著名的铁铜多金属成矿带，分布有大冶、九瑞、庐枞、宁芜、铜陵等矿集区（常印佛等，1991；翟裕生等，1992）. 其中，庐枞（庐江—枞阳）盆地内陆相火山岩广泛发育，主要为一套形成于中国东部燕山期岩浆大爆发事件的富碱橄榄安粗岩系，共划分为 4 个喷发旋回，总厚度约 3 km（于学元和白正华，1981；任启江等，1993；刘洪等，2002；董树文等，2009）. 周涛发等（2008）利用火山岩锆石 LA-ICPMS 测定庐枞盆地龙门院旋回、砖桥旋回、双庙旋回和浮山旋回火山岩形成的主体时间分别为 134.8±1.8 Ma、134.1±1.6 Ma、130.5±0.8 Ma 和 127.1±1.2 Ma，由此可见，庐枞盆地火山岩浆活动时间为 135～127 Ma，属早白垩世火山作用的产物. 袁峰等（2008）研究发现庐枞盆地火山岩岩浆均源于性质接近于 EMI 型富集地幔的交代地幔，各旋回火山岩岩浆演化过程中存在结晶分异作用，同时还受到了一定的地壳物质混染火山岩由早到晚具有向高钾、负异常增强、结晶分异作用增强、岩浆分异程度增高方向的演化规律.

庐枞盆地矿产资源潜力巨大，分布有以罗河、龙桥大型铁矿为代表的一系列矿床. 泥河铁矿是近年来新发现的大型隐伏矿床，它位于庐枞盆地西北部边缘的北东向基底隆起带上，毗邻罗河铁矿. 北东向的罗河—缺口隐伏断裂穿过矿区的西北部，该断裂是一条切穿莫霍面（Moho）的深断裂，倾向南东，为地幔流体和岩浆上涌、喷发提供了通道（董树文等，2009）. 矿区大部分被第四系所覆盖，仅零星出露下白垩统杨湾组砂砾岩、双庙组安粗岩和浮山组粗面质熔结凝灰岩及凝灰质粉砂岩（图 1），钻孔揭露有砖桥组安粗岩以及次火山岩体（闪长玢岩、安山玢岩）. 铁、硫矿体主要赋存于闪长玢岩体顶部及与砖桥组的接触带附近，并常伴随有少量的铜、铅锌矿化.

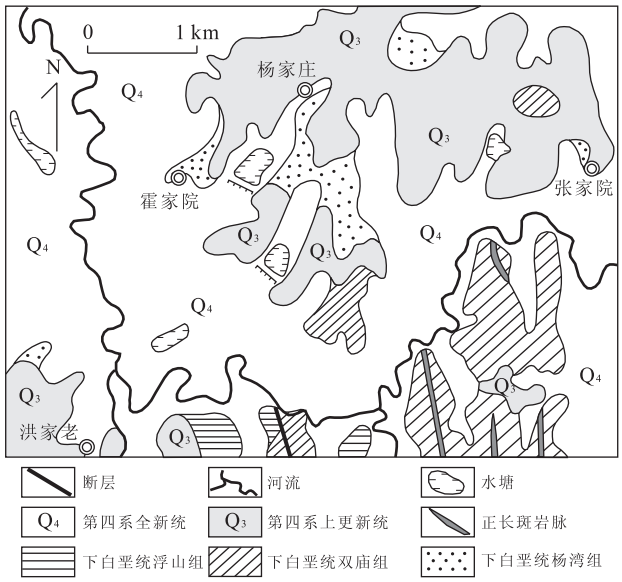

图 1　泥河铁矿矿区地质简图（据安徽省区调队 1981 资料改编）

Fig. 1　Simplified geological map of the Nihe iron deposit

泥河铁矿矿体整体呈北东向展布，南段以磁铁矿为主，中段以硬石膏矿为主，北段以硫铁矿为主. 矿石类型可分为磁铁矿石、赤铁矿—磁铁矿石、黄铁矿—磁铁矿石、硬石膏—黄铁矿石等. 金属矿物以磁铁矿、黄铁矿为主，次为赤铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等. 矿石具有块状、角砾状、浸染状和细脉状等构造.

2　样品特征与分析方法

实验样品来自泥河铁矿的 ZK0501、ZK1301、ZK0601、ZK1001 和 ZK2201 钻孔岩心. 其中，ZK0501 钻孔完成于 2007 年，设计孔深 675 m，实际终孔深度为 1 096 m，单孔见矿厚度约 280 m，从而拉开了泥河铁矿整装勘查的序幕. 泥河铁矿的钻孔岩心保存十分完好，满足 X 射线荧光光谱原位分析的要求.

样品分析采用国产的 EDX-P730S 型便携式 X 射线荧光光谱仪，具有轻便、操作简单等特点，适于野外工作环境. 其工作原理是通过发射高能量的 X 射线激发岩石样品，驱逐内层电子而出现空穴，使整个原子体系处于不稳定的激发态，当能量高的较外层电子跃入能量较低的内层空穴所释放的能量不在原子内被吸收，而是以辐射形式放出，便产生 X 射

线荧光，其能量等于两能级之间的能量差. 因此，可以通过接收和分析 X 射线荧光的能量（或波长）特征来测定样品的元素含量. PXRF 技术目前常被用于岩石露头地球化学研究和土壤重金属污染评价等方面（Jones *et al*.，2005；Potts *et al*.，2006；De-Kosky，2009；Jang，2010；Peinado *et al*.，2010）. 本文为系统研究钻孔岩心的元素含量变化及矿化蚀变特征，首先对岩心进行岩性分层（划分至最小岩性段）、清洗后晾干，并进行数码照相. 在此基础上，对该岩性段选择有代表性且相对平整（或平滑）的部位利用便携式 X 射线荧光光谱仪测量 6～10 个点，为保证精度，每点测量时间为 30 s，可直接读出 Fe、Ti、V、Cr、Mn、Cu、Zn、Mo、Ca、K 等 22 个元素含量，取平均值后作为该岩性段的平均含量；考虑到测量点的代表性问题，对于斑状结构的岩石和有岩（矿）脉分布的岩性段，先估计斑晶与基质（或脉体与其他岩矿石）的体积分布比例，分别对其测量6～10 个点，取平均值后再根据其分布比例进行加权平均. 在此基础上，研究钻孔岩心元素含量垂向变化规律，绘制全孔或勘探线剖面元素含量分布图，配合地质观察，识别岩心矿化与蚀变信息.

3 结果

研究表明，泥河铁矿的成矿元素和蚀变指示元素的含量在垂向变化上呈现出一定的规律性，且利用 PXRF 技术获得的岩心 Fe 元素含量的空间变化与根据化学分析得到的铁矿石品位数据而圈定的磁铁矿体范围能较好地吻合（图 2）. 以 ZK0501 钻孔为例，K、Co、Zr、Nb、Pb、As 等元素在钻孔浅部双庙组和砖桥组火山岩石中相对富集，Zn、Cu、Mo 等元素在闪长玢岩体顶部内接触带及黄铁矿脉附近出现峰值，Fe、Mn、Cr、Ti、V、Ni、Bi、Ca 等元素在磁铁矿体附近相对富集，Cs、Sb、Ag 等元素的峰值分布似乎具有一定的随机性. 通过因子分析，第一因子 F_1 为 Fe-V-Mn-Cr-Ni-Ti-Bi 等元素组合，对铁矿化具有较好的指示作用；第三因子 F_3 为 Zn-Cu-Cd 等元素组合，则对铜、锌矿化有一定指示意义（图 3）. 从图 3 还可得知，ZK0501 钻孔岩心中 K 元素含量垂向变化出现两个相对集中的峰值分布区，其中一个分布于 400～700 m 深度范围内，对应于砖桥组上部粗安岩以及闪长玢岩体顶部大量发育的脉状钾长石化（图 4a）；另一个峰值区分布在 50～350 m 深度范围内，对应于双庙组粗安岩中的脉状钾长石化（图 4b）

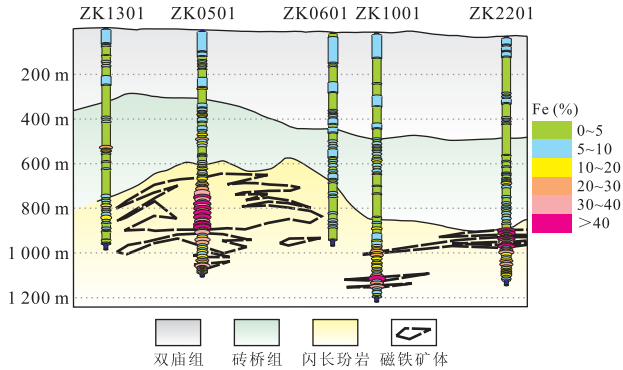

图 2 泥河铁矿 I 纵剖面钻孔岩心 Fe 元素 PXRF 分析结果

Fig. 2 Fe composition in drills of No. I section of the Nihe iron deposit obtained by PXRF

和明矾石化，此外，在磁铁矿体中也存在一些浸染状和细脉状钾长石化（图 4c 和图 4d），以及在矿体底部的闪长玢岩中存在斜长石斑晶边缘被钾长石交代的现象（图 4e），从而产生一些零星分布的 K 元素含量的峰值. 这些大量出现的钾长石蚀变现象也进一步佐证了庐枞盆地中生代火山岩系总体上富 K 的特征. 该钻孔岩心中 Ca 元素含量垂向分布则呈现出与 K 元素截然不同的特征. Ca 元素含量的峰值主要是由硬石膏化和磷灰石化引起. 各类硬石膏（脉）在泥河铁矿中非常发育，硬石膏通常形成于成矿之后，且具有多个期次，其穿插切割关系明显（图 4f 和图 4g）. 在钻孔深度大于 680 m 时，Ca 元素含量相对较高，可能由大脉状硬石膏和膏辉岩（硬石膏—辉石岩）化引起. 此外，富含 Fe 和 Cl、P 等挥发组分的成矿流体冷却成矿后，挥发组分散失，并在块状磁铁矿富矿体中留下气孔，后来被硬石膏或黄铁矿—硬石膏所充填（图 4h）.

4 结论与讨论

PXRF 被誉为地质学家的眼睛，常用于野外原位快速分析. 利用 PXRF 半定量研究钻孔岩心的矿化与蚀变信息不但可行，而且具有方便、快捷、实用、可靠、无损、成本低廉等优点，尤其是在钻孔岩心的保护方面，该项新技术克服了传统测试分析需要破坏岩心的缺陷，可以使大量岩心及其所包含的宝贵的地质现象得以最大限度的保存.

在应用 PXRF 识别岩心矿化和蚀变信息的过程中，还存在一些值得特别注意的地方：（1）Si、S 等元素检测的问题，由于仪器等原因，本研究未能对岩心的 Si 和 S 进行测试，故不能有效识别硅化（次生

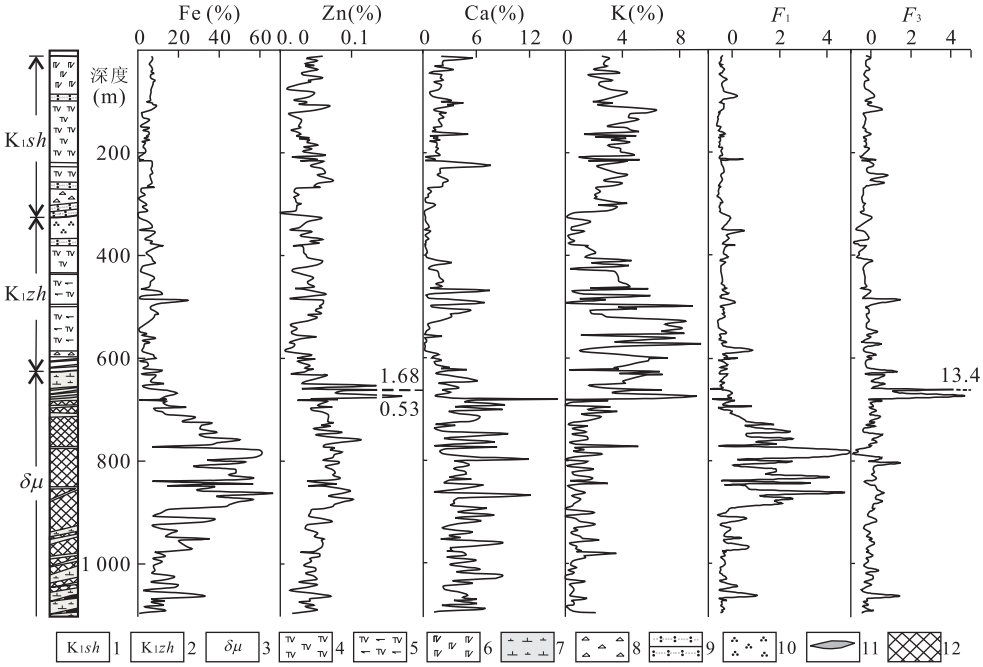

图 3　泥河铁矿 ZK0501 钻孔岩心部分元素含量分布

Fig. 3　Element compositions map of drill of No. ZK0501 of Nihe iron deposit

1. 下白垩统双庙组；2. 下白垩统砖桥组；3. 闪长玢岩；4. 粗安岩；5. 辉石粗安岩；6. 玄武粗安岩；7. 闪长玢岩；8. 火山碎屑岩；9. 凝灰质粉砂岩；10. 次生石英岩；11. 黄铁矿脉；12. 磁铁矿体

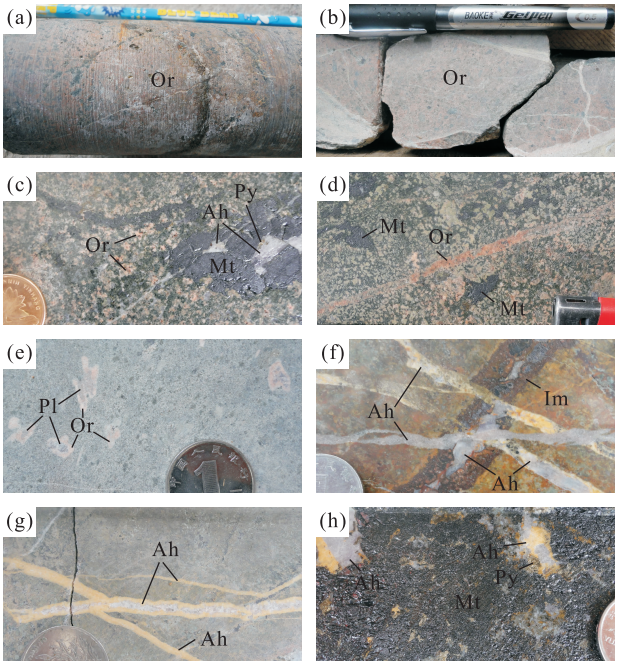

图 4　泥河铁矿钻孔岩心中的部分蚀变现象

Fig. 4　Some alteration photographs in drill of Nihe iron deposit

Or. 钾长石；Pl. 斜长石；Ah. 硬石膏；Py. 黄铁矿；Mt. 磁铁矿；Im. 褐铁矿

石英岩化）等蚀变和区分磁铁矿（赤铁矿）与黄铁矿；(2)样品测点的代表性问题，由于国产 EDX-P370S 发射的高能粒子束直径较小（约 1 mm），在岩心样品分析中必须充分考虑样品测点的代表性问题；(3)影响因素问题，如样品粗糙程度、干湿度等都对 PXRF 分析结果有一定影响，必须谨慎处理；(4)对相关技术流程还可以进行深入探索，如等间距连续测点方法与本文采用的先分层后测点方法的对比，PXRF 分析结果与实验室分析结果的对比，等等. 然而，随着 PXRF 技术的不断发展，其检出限不断减低，仪器的稳定性和分析精度不断提高，PXRF 必将在钻孔岩心及野外露头的矿化和蚀变信息原位分析中发挥不可替代的作用.

致谢：谨以此文祝贺敬爱的导师赵鹏大院士从事地质教育工作 60 周年暨 80 华诞！作者在安徽泥河铁矿野外工作中得到五矿资源公司和安徽省地调院的大力协助，在此深表感谢！

References

Chang, Y. F., Liu, X. P., Wu, Y. C., et al., 1991. Iron-copper mineralization belt of middle-lower Yangtze valley. Geological Publishing House, Beijing, 1—56 (in Chinese).

DeKosky, R., 2009. Developing chemical instrumentation for environmental use in the late twentieth century: detecting lead in paint using portable X-ray fluorescence spectrometry. *Ambix*, 56(2): 138—162. doi: 10.1179/

174582309X441408

Dong, S. W., Gao, R., Lü, Q. T., et al., 2009. Deep structure and ore-forming in Lujiang-Zongyang ore concentrated area. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(3): 279－284 (in Chinese with English abstract).

Jang, M., 2010. Application of portable X-ray fluorescence (PXRF) for heavy metal analysis of soils in crop fields near abandoned mine sites. *Environmental Geochemistry and Health*, 32(3): 207－216. doi: 10.1007/s10653－009－9276－z

Jones, M. C., Williams-Thorpe, O., Potts, P. J., et al., 2005. Using field-portable XRF to assess geochemical variations within and between dolerite outcrops of Preseli, South Wales. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(3): 251－269. doi: 10.1111/j.1751－908X.2005.tb00899.x

Liu, H., Qiu, J. S., Luo, Q. H., et al., 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: geochemical constraints. *Geochimica*, 31(2): 129－140 (in Chinese with English abstract).

Peinado, F. M., Ruano, S. M., Gonzalez, M. G. B., et al., 2010. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). *Geoderma*, 159(1－2): 76－82. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.06.019

Potts, P. J., Bernardini, F., Jones, M. C., et al., 2006. Effects of weathering on in situ portable X-ray fluorescence analyses of geological outcrops: dolerite and rhyolite outcrops from the Preseli Mountains, South Wales. *X-Ray Spectrometry*, 35(1): 8－18. doi: 10.1002/xrs.881

Ren, Q. J., Wang, D. Z., Xu, Z. W., et al., 1993. Forming, evolution and mineralization of volcanic-structural depression in Luzong region of Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 67(2): 131－145 (in Chinese with English abstract).

Yu, X. Y., Bai, Z. H., 1981. Latitic series in Lujiang-Zongyang region. *Geochimica*, 5(1): 57－64 (in Chinese with English abstract).

Yuan, F., Zhou, T. F., Fan, Y., et al., 2008. Soure, evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1691－1702 (in Chinese with English abstract).

Zhai, Y. S., Yao, S. Z., Lin, X. D., et al., 1992. Metallogenic of iron-copper- (gold) deposits of the middle and lower reaches of Changjiang River. Geological Publishing House, Beijing, 1－12 (in Chinese).

Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2008. Chronology and its meaning of volcanic rocks in Luzong (Lujiang-Zongyang) basin, Anhui Province. *Science in China (Series D)*, 38(11): 1342－1353 (in Chinese).

附中文参考文献

常印佛，刘湘培，吴言昌，等，1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京：地质出版社，1－56.

董树文，高锐，吕庆田，等，2009. 庐江－枞阳矿集区深部结构与成矿. 地球学报，30(3)：279－284.

刘洪，邱检生，罗清华，等，2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学，31(2)：129－140.

任启江，王德滋，徐兆文，等，1993. 安徽庐枞火山－构造洼地的形成、演化及成矿. 地质学报，67(2)：131－145.

于学元，白正华，1981. 庐枞地区安粗岩系. 地球化学，5(1)：57－65.

袁峰，周涛发，范裕，等，2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报，24(8)：1691－1702.

翟裕生，姚书振，林新多，等，1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京：地质出版社，1－12.

周涛发，范裕，袁峰，等，2008. 安徽庐枞(庐江－枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学(D辑)，38(11)：1342－1353.