·研究成果·

矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol. 29 No. 2, Apr. 2010

冀西石湖金矿黄铁矿和石英的晶胞参数特征及其地质意义

曹 烨[1,2,3], 李胜荣[1,2], 张华锋[1,2], 敖 翀[2], 李真真[2], 刘小滨[2]

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 劳伦森大学地球科学系, 萨德伯里, P3E2C6, 加拿大

摘 要: 将石湖金矿的成矿过程划分为4个阶段: 黄铁矿-石英阶段, 石英-黄铁矿阶段, 多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。分别对4个成矿阶段中的黄铁矿和石英进行了晶胞参数测定。结果表明, 黄铁矿的 a_0 和 υ_0 随着成矿阶段的演化和深度的增加有减小的趋势, 且主成矿阶段为最小值; 石英的 c_0 和 c_0/a_0 从Ⅰ→Ⅳ阶段具有减小的趋势, 石英 a_0 值随深度增加而变大, 而 c_0 值和 c_0/a_0 随深度增加呈韵律式变化。根据晶胞参数推测, 黄铁矿中Co、Ni、As含量高, 且未发生S亏损; 石英类质同象以Al、Fe等置换杂质为主。本区含矿黄铁矿和石英的晶胞参数分别以 a_0 值较小和 a_0 值较大, c_0 值较小, c_0/a_0 值较小为特征。黄铁矿的 a_0 和石英的 c_0 和 c_0/a_0 绝大多数大于理想值, 所以矿体剥蚀不大, 深远景广阔。

关 键 词: 黄铁矿; 石英; 晶胞参数; 成因矿物学; 金矿

中图分类号: P579 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-2802(2010)02-0185-07

Characteristics of Cell parameters of Pyrite and Quartz and Their Geological Significance at Shihu Gold Deposit in Western Hebei, North China

CAO Ye[1,2,3], LI Sheng-rong[1,2], ZHANG Hua-feng[1,2], AO Chong[2], LI Zhen-zhen[2], LIU Xiao-bin[2]

1. *State Key Laboratory of geological processes and mineral resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*,; 2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 3. *Department of Earth Sciences, Laurentian University, Sudbury, P3E2C6, Canada*

Abstract: Gold Mineralization of the Shihu deposit can be divided into 4 stages, pyrite-quartz stage, quartz-pyrite stage, polymetallic sulfide stage and quartz-carbonate stage. Cell parameters of pyrite and quartz from 4 stages were analyzed in this paper. The analytical results of pyrite indicated that the value of a_0 and υ_0 is minimum in Ⅲ stage; the values of a_0 and υ_0 decrease as mineralization stage proceeds from Ⅰ to Ⅳ and as the depth of ore-body increases from 560 to 180 meters. The analytical results of quartz indicated that the values of c_0 and the c_0/a_0 ratios decrease as mineralization stage changes; the values of a_0 increase as the depth of ore-body increases; the values of c_0 and the c_0/a_0 ratios change rhythmically as the depth of ore-body increases. Results of cell parameters suggested that pyrites have high contents of Co, Ni and As, and have not undergone S depletion. Moreover, Al and Fe are the major replacement impurities in isomorphism of quartz. Gold-bearing pyrites are characterized by small a_0, while gold-bearing quartz are characterized by big a_0, small c_0 and c_0/a_0 ratio. The values of a_0 of pyrite and the values of c_0 and c_0/a_0 ratios of quartz are mostly larger than their ideal values. Therefore, denudation of the gold ore-body is slight, and potential value of this deposit is considerable.

Key words: pyrite; quartz; cell parameter; genetic mineralogy; gold deposit

收稿日期: 2009-08-10 收到, 12-18 改回

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(90914002); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B07011); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200811011); 全国危机矿山接替资源找矿项目(20089937)

第一作者简介: 曹烨(1983—), 男, 博士, 专业方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: cykaiyang@yahoo.com.cn.

石湖金矿是太行山区唯一的超大型石英脉型金矿，黄铁矿和石英是其最重要最常见的贯通矿物，前人对黄铁矿的热电性，微量元素，S、Pb 同位素和石英热释光，流体包裹体等成因矿物学特点进行过详细的研究[1~6]。但至今对贯通矿物的晶体结构缺乏详细的报道。我国学者对黄铁矿和石英晶胞参数的变化规律在金矿找矿和矿床评价方面的应用有专门的论述[7,8]，并在胶东乳山、三山岛、夏甸等金矿田的找矿勘探中取得了显著效果[9~11]。晶胞参数是黄铁矿和石英结构态的综合反映，对其时空变化规律的探讨，有助于指导找矿和分析矿床成因。

1 地质背景

石湖金矿位于河北石家庄市灵寿县西北部山区。大地构造位置在华北地台太行隆起区之东南部。矿区出露有太古宙的阜平杂岩，主要为角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩，夹少量浅粒岩、大理岩、斜长角闪岩和角闪磁铁石英岩(图 1)。

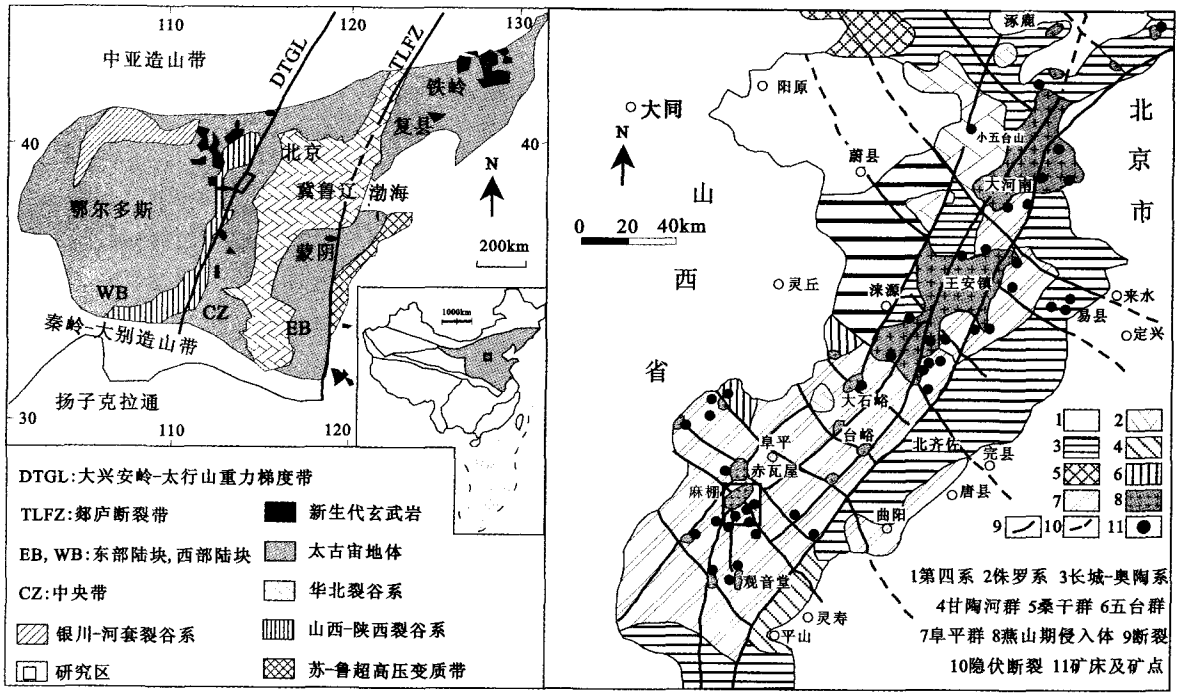


图 1 冀西石湖金矿大地构造位置略图[12,13]

Fig. 1 Skeleton geological map of the Shihu gold deposit, western Hebei[12,13]

区内构造发育，主体构造格局为阜平运动形成的近东西向复式褶皱和断裂构造，其次为燕山期形成的北北西、南北、北东和少量东西、北西向褶皱和断裂构造等，其中东西向深部断裂构造为主要的控岩和导矿构造，南北、北西向断裂构造为主要的控矿与容矿构造[14]。

区内出露的岩浆岩以燕山期中酸性花岗岩类为主，其中以麻棚岩体和赤瓦屋岩体出露面积最大；麻棚岩体出露面积达 64.5 km^2，岩体明显受北冶-麻棚-杨家庄深大断裂控制[15]。岩体与围岩阜平群地层呈侵入接触，锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示其形成年代约为 131 Ma，为晚侏罗世岩浆活动产物，由基底岩石重熔而成。

金矿化受断裂构造尤其是脉带内次级构造的控制，具有分支复合现象。101 号脉是石湖金矿的主体矿脉，硅化蚀变破碎带长 3300 m，宽 4.5～50 m，走向近南北，倾向东，倾角 60°～80°。101 号矿带中共圈定矿体 8 个，其中主矿体 2 个(101-2 和 101-4)。两矿体均呈似板状或透镜状，向南侧伏，侧角 30°，形态复杂，沿东走向和倾向不太连续，走向长 35～430 m，最大倾斜延伸 420 m，最厚 5.71 m，最薄 0.27 m，品位最高 342.7 g/t，最低 1.79 g/t，平均 10.12 g/t。两个矿体矿石量 142 万 t，金金属量 13720 kg。在其它平行小矿体中探明石量 14 万 t，金的金属量为 521 kg[16]。

2 矿物生成阶段

成矿期的开端应以介质由碱性向酸性、氧化向还原、金由迁移向沉淀的转变算起[8]。野外观察和研究表明，矿床蚀变作用应是多期次不连续的过程，可划分为 4 个成矿阶段：

Ⅰ. 黄铁矿-石英阶段：为含金石英脉的主体。

石英乳白色，他形粗粒(0.15～0.18 cm)，表面干净，透明度好；黄铁矿呈完整立方体，粒径 0.5～2 cm，晶面条纹极为发育，呈斑点状(或小团块状)分布于石英脉中。石英脉中 n～$n\times10$ cm 级的晶洞发育。黄铁矿和石英缝隙中偶见自然金。

Ⅱ. 石英-黄铁矿阶段：为含金黄铁矿脉的主要工业矿体。黄铁矿含量占脉体的 60%以上，常呈 20～80 cm 宽、$n\times100$ m 长的单脉和复脉产出。黄铁矿为块状，半自形－自形，粒径一般 0.5 cm，晶面条纹和多种聚形发育。石英为灰白色，光泽较暗，透明度较差，他形，中粒(粒径 0.05 cm 左右)；小晶洞($n\times10$ mm 级)大量发育。含少量黄铜矿和闪锌矿。

Ⅲ. 多金属硫化物阶段：构成闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-石英小脉，穿插于早阶段的矿物中，或充填于早阶段的晶洞中。闪锌矿含有乳滴状黄铜矿，出现较多细粒烟灰色石英。本阶段矿脉金品位很高，金品位常达 $n\times100$ g/t。

Ⅳ. 石英-碳酸盐阶段：以细脉状石英-方解石的形式穿插于早阶段的矿脉和围岩中；石英方解石小脉中含少量细粒立方体、无晶面条纹的黄铁矿。

3 测试结果

石湖金矿中的黄铁矿和石英晶胞参数在中国地质大学(北京)单晶衍射实验室进行。仪器为德国 Bruker axs 公司出产的 Snart Apex 型的单晶 X 射线衍射仪，分辨率为 15 μm。

黄铁矿和石英的晶胞参数见表 1 和表 2。矿体深度、成矿阶段与晶胞参数 a_0、c_0、c_0/a_0 关系见图 2。

表 1 冀西石湖金矿黄铁矿晶胞参数

Table 1 Cell parameters of pyrite in the Shihu gold deposit, western Hebei nm

标 高	成矿阶段	a_0	Δa_0	v_0	Δv_0
180	Ⅳ	0.54199	0.00027	15.921	0.0155
180	Ⅱ	0.54235	0.00013	15.9526	0.0077
180	Ⅲ	0.54192	0.00107	15.9146	0.0735
220	Ⅱ	0.54263	0.00062	15.9776	0.0339
220	Ⅱ	0.54213	0.00278	15.9331	0.1503
260	Ⅲ	0.54068	0.00079	15.8058	0.0335
300	Ⅲ	0.54181	0.0007	15.9051	0.0633
300	Ⅱ	0.54255	0.00029	15.9705	0.0170
400	Ⅰ	0.54324	0.00171	16.0315	0.0810
560	Ⅲ	0.54198	0.00046	15.9206	0.0201

表 2 冀西石湖金矿石英晶胞参数

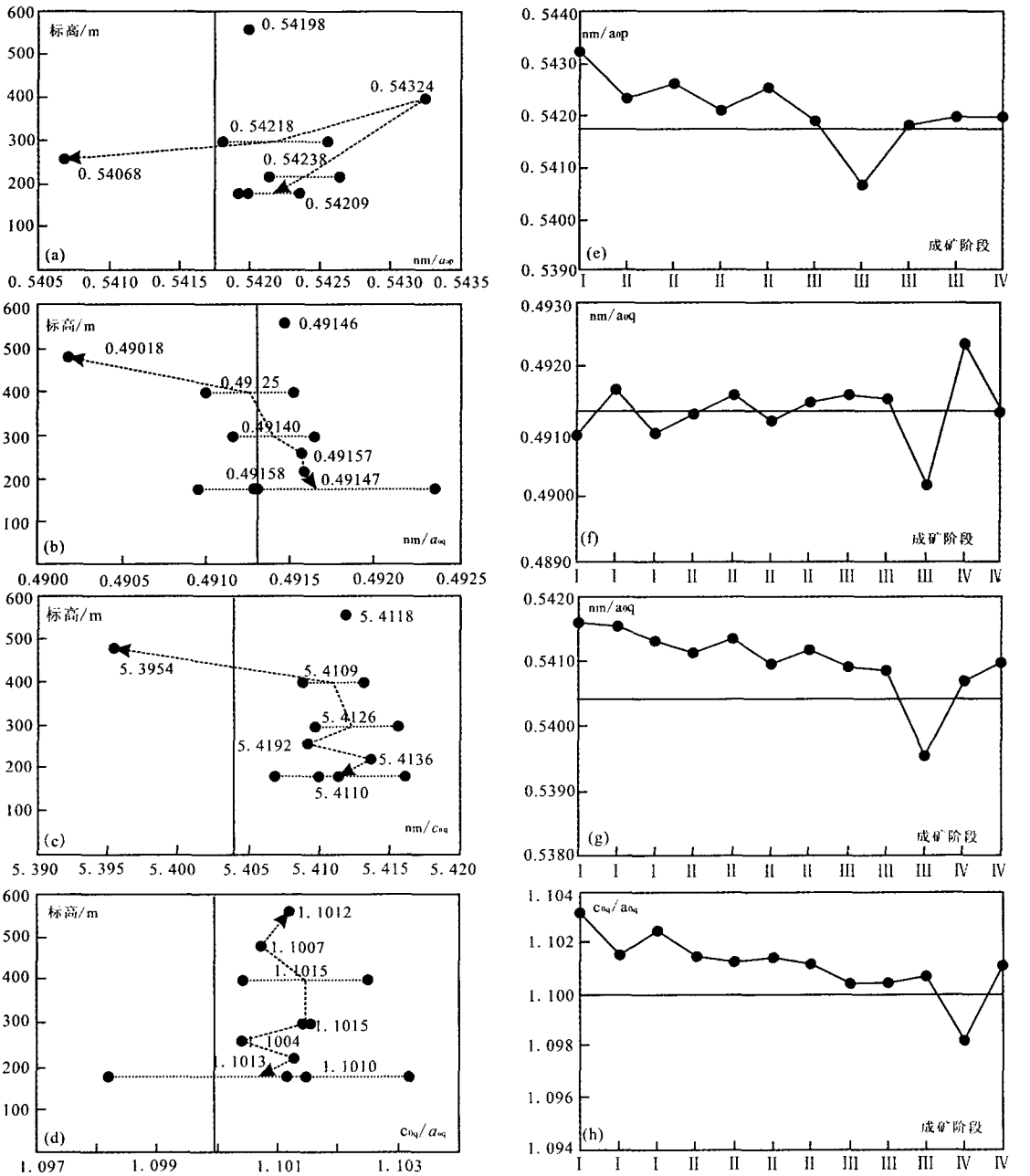
Table 2 Cell parameters of quartz in the Shihu gold deposit, western Hebei nm

标高/m	成矿阶段	a_0	c_0	Δa_0	Δc_0	c_0/a_0	$(\Delta a_0/a_0)/(\Delta c_0/c_0)$	v_0
180	Ⅳ	0.49235	0.54069	0.00107	0.00027	1.09818	4.35206	0.113508
180	Ⅳ	0.49130	0.54099	0.00002	0.00057	1.10114	0.03864	0.113086
180	Ⅱ	0.49128	0.54113	0.00000	0.00071	1.10147	0.00000	0.113108
180	Ⅰ	0.49095	0.5416	0.00033	0.00118	1.10317	0.30851	0.113055
220	Ⅱ	0.49158	0.54136	0.00030	0.00094	1.10127	0.35147	0.113291
260	Ⅲ	0.49157	0.54092	0.00029	0.00050	1.10039	0.63823	0.113197
300	Ⅰ	0.49164	0.54155	0.00036	0.00113	1.10152	0.35093	0.113363
300	Ⅱ	0.49115	0.54096	0.00013	0.00054	1.10142	0.26516	0.113015
400	Ⅲ	0.49151	0.54087	0.00023	0.00045	1.10043	0.56244	0.113156
400	Ⅰ	0.49099	0.54131	0.00029	0.00089	1.10249	0.35924	0.113012
480	Ⅲ	0.49018	0.53954	0.00110	0.00088	1.10070	1.37587	0.112271
560	Ⅱ	0.49146	0.54118	0.00018	0.00076	1.10117	0.2608	0.113202

注：测试人，熊明；测试日期：2008 年 5 月

黄铁矿晶胞参数值的变化范围为 $a_0=0.54068$～0.54324 nm，$v_0=0.158058$～0.160315 nm^3，平均 $a_0=0.542128$ nm，$v_0=0.1593324$ nm^3，与理想值($a_0=0.54176$ nm，$v_0=0.1590087$ nm^3)相比较，除了 1 个样品之外，其他所有分析值均偏高，大于标准值(图 2a)，这一特点与胶东乳山金矿的黄铁矿相同，而与胶西北玲珑、栖霞、三山岛多数偏低的特征相反。Ⅰ、Ⅱ阶段的黄铁矿的晶胞参数 a_0 大于 0.5420 nm，Ⅲ、Ⅳ阶段的小于 0.5420 nm。总体上为Ⅰ＞Ⅱ＞Ⅳ＞Ⅲ，即主成矿阶段(Ⅱ和Ⅲ阶段)的 a_0 最小(图 2e)。富矿段黄铁矿 a_0 垂向上的变化表明，从 400 m→300 m→260 m 和 400 m→220 m→180 m 均显示了随深度增大而减少的趋势(图 2a)。

石英的标准晶胞参数为 $a_0=0.4913$ nm，$c_0=0.5404$ nm，$v_0=0.1130$ nm^3。本矿区石英晶胞参数为 $a_0=0.49018$～0.49235 nm，$c_0=0.53954$～0.54160 nm，平均 $a_0=0.49133$ nm，$c_0=0.5410$ nm；均接近于理论值，除1个样品外，c_0 和 c_0/a_0 均



图中 a_{0p}、a_{0q}、c_{0q}分别代表黄铁矿和石英的晶胞参数值；

图中的数字为同一深度的 a_0、c_0、c_0/a_0 平均值

图 2 冀西石湖金矿黄铁矿和石英晶胞参数值与深度和成矿阶段的关系

Fig. 2 Relationship between cell parameters (pyrite and quartz) and mineralization stage/ore-body depth (the Shihu gold deposit, western Hebei)

大于标准值(图 2c,d)。不同成矿阶段的石英晶胞参数变化范围均较大,国内有些矿区石英晶胞参数与矿化程度具正消长关系,本区 a_0 值随深度增加而变大的明显关系(图 2b)表明,深部矿化度有增强的趋势;c_0 值从Ⅰ→Ⅳ阶段具减小趋势(图 2g),c_0/a_0 也有减小的趋势(图 2h),且主成矿阶段(Ⅲ)为最小值;而 c_0 值和 c_0/a_0 与深度呈韵律式变化。

4 晶胞参数的成因意义

4.1 黄铁矿

黄铁矿晶胞参数 $a_0=0.54176$ nm。黄铁矿微量元素和 S/Fe 值的变化都能引起 a_0 值的改变。

一般认为 Co、Ni、As、Se、Te 作为进入黄铁矿会使 a_0 增大。原因是 Fe-S、Co-S、Ni-S 距离是依次增

大的，分别为 0.226、0.234 和 0.240 nm。As 置换 S 也会引起 a_0 增大，若 1% 的 As 置换 S，至少引起黄铁矿 a_0 值增大 0.00024 nm。

文献[17]和[18]提出过黄铁矿 Co、Ni 含量与 a_0 值关系式：

$a_0 = 0.54176 + 0.000124X + 0.000271Y$。

式中，X 为 CoS_2 分子百分数，Y 为 NiS_2 分子百分数。

当黄铁矿 S/Fe＜2 时，a_0 值减小；这可能是黄铁矿 S 空位的形成导致 Fe-S 共价键增加，Fe-S 键长减小，致使 a_0 值减小。因此对黄铁矿 a_0 值的变化需综合考虑。

通常条件下黄铁矿固溶体的范围很窄。虽然 Fe、Mn、Co、Ni、Cu、Zn 和 Cd 的二硫化物都是黄铁矿型结构，但只有 FeS_2、CoS_2、NiS_2 的键长相近，黄铁矿中 Co、Ni 常置换 Fe，S 常被 As、Se、Te 等置换[19]。而相当多杂质元素含量很低，常在万分之几以下，它们对晶胞参数的影响可忽略不计。如果采取每 1% As 置换 S 引起黄铁矿晶胞增大 0.00024 nm 的粗估值，则含 As 3% 的黄铁矿 $a_0 = 0.54369$ nm。一般来说，影响黄铁矿晶胞参数变化的因素主要是类质同象元素的种类与数量，以及 S 离子的数量（如 Co、Ni、As 含量增加会使 a_0 增大，而 S 离子亏损时，a_0 值减小）。本区黄铁矿的 Co、Ni、As 含量均较高，Co、Ni、As 是影响黄铁矿晶胞参数大小的主要因素。大多数样品 Fe/S＜0.5[2, 20]，未发生 S 离子亏损，所以，大多数 a_0 值高于标准值。Ⅱ、Ⅲ阶段黄铁矿 a_0 值从矿区深部向浅部增大，与 Fe/S 值降低的变化规律基本一致。由此推测，黄铁矿晶胞参数 a_0 值在深部矿体中的减小，在浅部矿体中的较大的主要原因是成矿时 fs_2 从深部向浅部变大。

4.2 石英

石英晶胞参数的变化具有成因意义。这种变化受类质同象代换、温度和压力的控制，因为微量元素（如 Al、Fe、Ti、Ge、Ga 等）进入石英有两种方式，一种是类质同象置换 Si^{4+}，使 a_0、c_0 都增大，另一种（如 Na、K、Ca、Li 等）以填隙方式进入空隙，只能使 a_0 增大[21]；因此，各个轴变化率的比值，标志着杂质存在的状态：$(\Delta a/a)/(\Delta c/c)$＜1.5，以含置换杂质为主；$(\Delta a/a)/(\Delta c/c)$＞1.7，以含填隙杂质为主；$(\Delta a/a)/(\Delta c/c)$为 1.4～1.7，两种杂质同时存在。

人工合成实验发现，α-石英含 Ge 为 0.0433%～2.25%，a_0 为 0.49132～0.49157 nm，c_0 = 0.54046～0.54076 nm；含 Ge = 0.00012%～0.00485%，a_0 = 0.49129～0.49134 nm，c_0 = 0.54042～0.54051 nm。

不同温度合成的石英，a_0、c_0 随温度升高而减小，因为 a_0 减少速度较快，故 c_0/a_0 随降温而呈直线增大[22]。压力的增加使晶胞参数变小，原因是 Si—O—Si 夹角减小[23]。

石英是架状构造，具有较大的通道，直径可达 0.2 nm，并平行 c 轴分布，称结构孔道。此外，缺陷的孔道可达 25 nm，并呈各种形状。这种孔道是由格子扭曲和内应力所致，若没有这种扭曲，离子半径＞0.057 nm 的元素，不能进入石英。因此，石英的晶格扭曲可以促进了元素的类质同象替换[9]。

石英中 Al、Fe、Ti、Ge、Ga 等对 Si^{4+} 的置换使其 a_0、c_0 同时增大，而以填隙方式进入石英的补偿元素（如 Na、K、Li、Ca 等）只能使 a_0 值增大[21]。由此，Cohen 等[21]导出石英的轴变化率比值 $(\Delta a_0/a_0)/(\Delta c_0/c_0)$＜1.5 时，以含置换杂质为主，大于 1.7 时以填隙杂质为主，1.4～1.7 时两杂质并存。本区石英 $(\Delta a_0/a_0)/(\Delta c_0/c_0)$ 主要介于 0.03864～1.37587，应以 Al、Fe 等置换杂质为主。由于类质同象 Al 及补偿电价的碱金属离子进入石英晶格，引起了石英晶胞参数的变化，不同的地质环境中这些离子的含量和代换方式、程度均有差异，因此晶胞参数是反映石英地质成因的重要信息。石英结构中存在平行 c 轴的孔洞，Li、Na、K 等大离子进入孔洞会使 a_0 增大[24]，由此可选择 a_0 和 c_0/a_0 作为石英的结构标型。本区含矿石英 a_0 值较大，c_0 值较小，因此 c_0/a_0 值较小。随 Al、K 替代 Si 程度的增强，石英的 a_0 和 c_0 值呈增大的趋势。人工合成的 α-石英晶胞参数测定表明，随温度增高，c_0/a_0 有规律地增加[23]。本区石英 c_0/a_0 的变化也反映了各成矿阶段温度的变化，说明从早到晚温度降低。因此，可用石英晶胞参数探讨成矿作用过程。影响晶胞参数的因素较多，主要有类质同象、温度和压力，随着成矿阶段的演化对应石英晶胞参数依次减小，到脉体形成阶段，虽然温度还在变化，但幅度不大，晶胞参数的变化不显著，可以认为温度对本区石英晶胞参数的变化起了十分重要的作用。

5 结　论

(1)黄铁矿晶胞参数的 a_0 和 v_0 随成矿阶段的演化和深度的增加有减小的趋势。

(2)石英晶胞参数的 c_0 和 c_0/a_0 从Ⅰ→Ⅳ阶段具减小的趋势，而 a_0 的这一关系不明显；a_0 值随深度增加而变大，而 c_0 值和 c_0/a_0 和深度呈韵律式变

化。本区含矿石英 a_0 值较大，c_0 值较小，表现为 c_0/a_0 值较小的特征。

(3)本区石英晶胞参数的影响因素主要是温度和类质同象，其次是压力；石英 $(\Delta a_0/a_0)/(\Delta c_0/c_0)$ 主要为 0.03864～1.37587，所含杂质元素以 Al、Fe 等为主。

(4)由于深部温度高、压力大，在类质同象干扰相对较小的情况下，深部晶胞参数变小是必然的，石英的 c_0 和 c_0/a_0 和黄铁矿的 a_0 绝大多数大于理想值，推测矿体剥蚀不深，深部找矿远景广阔。

致 谢：感谢石家庄综合地质大队及石湖金矿的相关工作人员在野外工作和资料收集方面给予的大力支持。

参考文献 (References)：

[1] 许虹，李鸿超，李高山. 土岭-石湖金矿床黄铁矿找矿矿物学研究[J]. 地质找矿论丛，1992，7(4)：67－73.
Xu Hong, Li Hongchao, Li gaoshan. Prospecting mineralogy of pyrite in Tuling-Shihu gold deposit [J]. Contribution to Geology and Mineral Resources, 1992, 7(4): 67－73. (in Chinese with English abstract)

[2] 崔艳合. 土岭-石湖金矿床中黄铁矿的成分特征及其成因意义[J]. 岩石矿物学杂志，1993，12(4)：371－381.
Cui Yanhe. Chemical composition of pyrite from the Tuling-Shihu gold district and its genetic significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 1993, 12(4): 371－381. (in Chinese with English abstract)

[3] 喻学惠，任健业，张俊霞. 太行山中段铜金成矿条件及找矿方向[M]. 北京：地质出版社，1996：10－111.
Yu Xuehui, Ren Jianye, Zhang Junxia. Metallogenic condition and prospecting direction of Cu-Au deposit in middle of Taihang Mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 10－111. (in Chinese with English abstract)

[4] 刘伟，戴塔根，傅文杰，孙磊敬，胡斌. 冀西石湖金矿成矿流体特征[J]. 中国地质，2007，34(2)：335－340.
Liu Wei, Dai Tagen, Fu Wenjie, Sun Sangdun, Hu Bin. Characteristics of ore-forming fluids of the Shihu gold deposit, western Hebei[J]. Geology in China, 2007, 34(2): 335－340. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘伟，戴塔根，傅文杰，孙磊敬，胡斌. 冀西石湖金矿矿体赋存规律及深部找矿前景 [J]. 地质与勘探，2007，43(3)：25－30.
Liu Wei, Dai Tagen, Fu Wenjie, Sun Sangdun, Hu Bin. Ore occurrence regularity and prospecting of Shihu gold deposit in the western Heibei province [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(3): 25－30. (in Chinese with English abstract)

[6] 曹烨，李胜荣，敖翀，张华锋，李真真，刘小滨. 黄铁矿热电性特征在冀西石湖金矿床中的应用[J]. 中国地质，2008，35(4)：746－753.
Cao Ye, Li Shengrong, Ao Chong, Zhang Huafeng, Li Zhenzhen, Liu Xiaobin. Application of thermoelectric characteristics of pyrite into the Shihu gold deposit, western Hebei [J]. Geology in China, 2008, 35(6): 746－753. (in Chinese with English abstract)

[7] 陈光远，孙岱生，殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆：重庆出版社，1984：11－32.
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy [M]. Chong Qing: Chong Qing Press, 1984: 11－32. (in Chinese)

[8] 李胜荣，陈光远，邵伟，孙岱生. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京：地质出版社，1996：65－78.
Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. Genetic mineralogy of Rushan gold deposit in Jiaodong peninsula [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 65－78. (in Chinese)

[9] 陈光远，邵伟，孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆：重庆出版社，1989：94－323.
Chen Guangyuan, Shaowei, Shun Daisheng. Genetic mineralogy of gold deposit in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1989: 94－323. (in Chinese)

[10] 李胜荣. 陈光远教授学术思想讨论会纪要[J]. 矿物岩石地球化学通报，2001，20(2)：65.
Li Shengrong. Summary of academic ideology seminar of Prof. Chen Guangyuan [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(2): 65. (in Chinese)

[11] Li S R, Tong J G, Wang X H. A successful practice of mineralogical mapping for gold prospecting in Jingqingding gold mine, Rushan gold filed of Jiaodong craton, East China [A]. Li S R, Shen J F, X H. Mineralogy and geochemistry: Resources, environment and life [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 244－256.

[12] 汤艳杰，张宏福，英基丰，张瑾. 太行山地区中、新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化[J]. 岩石学报，2006，22(6)：1657－1664
Tang Yanjie, Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Zhang Jin. Source characteristics and temporal-spatial evolution of Mesozoic and Cenozoic basaltic magmatism in the Taihang mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 1657－1664. (in Chinese with English abstract)

[13] 牛树银，陈路，许传诗，等. 太行山区地壳演化及成矿规律[M]. 北京：地震出版社，1994：161.
Niu Shuyin, Chen Lu, Xu Chuanshi, *et al*. Crustal evolution and metallogenic regularity in the Taihang mountains [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1994: 161. (in Chinese)

[14] 张亚雄，陈松岭，彭省临，吴延之. 河北灵寿县土岭-石湖金矿田控矿构造研究[J]. 大地构造与成矿学，1996，20(1)：71－80.
Zhang Yaxiong, Chen Songling, Peng Shenglin, Wu Yanzhi. Study on the gold ore structure controlling to Tuling-Shihu gold deposit at Lingshou county in Hebei [J]. Geotectonica et

Metallogenia, 1996, 20(1): 71－80. (in Chinese with English abstract)

[15] 张亚雄，胡祥昭. 麻棚岩体特征及其与金矿成因关系研究[J]. 中南矿冶学院学报，1994，25(3)：275－281.
Zhang Yaxiong, Hu Xiangzhao. Research on the characteristics of Mapeng granitic intrusion and its contribution to the gold ore metallogeny [J]. Journal of Central-South Institute Mineral Metallogeny, 1994, 25(3): 275－281. (in Chinese with English abstract)

[16] 冶金工业部第一地质勘查局520队. 土石金矿区石湖矿段中间勘探地质报告[R]. 1990.
520 Team of First Geological Exploration Bureau of Ministry of Metallurgical Industry. Geological exploration report on the middle section of Tuling-Shihu gold mining area[R]. 1990. (in Chinese)

[17] 魏明秀. 黄铁矿晶胞参数公式的研究[J]. 科学通报，1980，25(17)：816.
Wei Mingxiu. Study on cell parameter equation of pyrite [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(17): 816. (in Chinese)

[18] 魏明秀. 黄铁矿晶胞参数计算及其某些杂质含量分布特征[J]. 矿物学报，1986，6(3)：245－251.
Wei Mingxiu. Cell parameter equation of pyrite and its genetic implications [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1986, 6(3): 245－251. (in Chinese with English abstract)

[19] 周学武，李胜荣，鲁力，林卫兵. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. 矿物岩石地球化学通报，2005，24(4)：317－326.
Zhou Xuewu, Li Shengrong, Lu Li, Lin Weibing. Research on the composition typomorphism of pyrite from Longkeng gold-silver mineralization district in Wuyi, Zhejiang Province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(4): 317－326. (in Chinese with English abstract)

[20] Xu Hong. Chemistry and thermoelectricity of pyrite in Tuling-Shihu gold deposit: Indicator for gold exploration [A]. Li Shengrong, Shen Junfeng, Xu Hong. Mineralogy and geochemistry: Resources, environment and life [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 193－200.

[21] Cohen A J, Sumner G G. Relationships among impurities contents color centers and lattice contants on quartz[J]. American Mineralogist, 1958, 43.

[22] Keith H D, Will H H. Lattice spacing in clear crystalline quartz and their variability [J]. American Mineralogist, 1955, 40.

[23] Amour H. D. Structure determination of α-quartz up to 68×10^8Pa[J]. Acta. Crust., 1979: 1335.

[24] 袁万明，莫宣学，喻学惠，罗照华. 东昆仑白金沟金矿床石英的成矿作用显示[J]. 矿物岩石地球化学通报，1998，17(4)：237－241.
Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Luo Zhaohua. Reflections of gold mineralization from quartz in the Baijingou Gold Deposit, Eastern Kunlun Mountains [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(4): 317－326. (in Chinese with English abstract)