

# 秦岭造山带秦岭岩群独居石电子探针化学年龄： 晚泛非期变质证据？

陈强 陈能松 王勤燕 孙敏 王新宇 李晓彦 舒桂明

( 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 香港大学地球科学系, 香港; 广西壮族自治区地质调查院, 南宁 530023;  
北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871. E-mail: qchen110@163.com)

**摘要** 陕西太白地区秦岭岩群中发育的十字石+蓝晶石+石榴石和夕线石+红柱石+石榴石+十字石两期矿物共生组合中独居石包裹体的电子探针化学年龄分别为 $(520 \pm 23)$ 和 $(435 \pm 9)$  Ma. 这表明, 秦岭岩群在早寒武世发生过一期重要的变质作用. 早寒武世变质作用可能是对晚泛非期俯冲增生构造热事件的响应.

**关键词** 独居石 电子探针定年 晚泛非期热事件 秦岭造山带

秦岭造山带是夹持于华北板块和扬子板块之间的大陆造山带(图 1), 是记录中国大陆地质演化的关键地区之一<sup>[1~4]</sup>. 以往研究认为东秦岭造山带的核部杂岩秦岭岩群主要经历了晋宁期和加里东期两大变质旋回<sup>[1~5]</sup>, 但最近的研究在秦岭及相邻地质体中乃至整个中央造山带范围内都发现了~500 Ma 的构造热事件记录<sup>[6~14]</sup>, 表明可能存在晚泛非期事件的影响. 独居石是变质泥质岩中常见的含 Th、U 和 Pb 的富稀土磷酸盐矿物, 在无流体作用的环境下, 对 Pb 的封闭温度可达 700 甚至更高<sup>[15]</sup>, 因此可以记忆不同阶段生长的时间. 电子探针具有高达 1  $\mu\text{m}$  的空间分辨率, 可以方便和有效地测定岩石薄片不同期次变质矿物中独居石包体的年龄<sup>[15~18]</sup>, 约束不同矿物组合的变质生长时代. 本研究应用电子探针化学定年法直接测定太白地区秦岭岩群富铝片麻岩薄片多世代变质矿物组合中的独居石包裹体年龄, 以揭示该地区早期变质历史.

## 1 地质背景

秦岭岩群的分布西起甘肃天水, 向东延经陕西凤太、商丹、河南西峡和内乡, 越南阳盆地至桐柏一带断续出露于东秦岭造山带的核部, 构造上属北秦岭构造带<sup>[1]</sup>. 秦岭岩群主体由下部的长英质粒岩岩组、中部的榴线片麻岩+钙硅粒岩岩组和上部的大理岩岩组构成, 变质程度总体达角闪岩相-高角闪岩相, 在桐柏一带达麻粒岩相<sup>[1~4]</sup>, 为一套经历了多期变质变形和岩浆作用的中深变质岩系. 众多学者认为秦岭岩群形成于古元古代<sup>[1~4]</sup>, 早前古生代的构造热演化主要划分为晋宁期(1000~800 Ma)和加里东期

(460~400 Ma)两大旋回<sup>[1~5]</sup>. 但近期对秦岭岩群及相邻地质体的研究不断鉴别出 1.0~0.9 Ga 的同碰撞花岗岩和 0.8~0.7 Ga 的与裂解相关的花岗岩<sup>[19,20]</sup>, 与 Rodinia 超大陆的汇聚与裂解相联系<sup>[19~21]</sup>, 在秦岭岩群的南北两侧发现了若干约 500 Ma 的超高压榴辉岩和高压麻粒岩相变质作用和岩浆活动证据<sup>[6~10,19]</sup>.

## 2 样品特征

陕西太白地区的秦岭岩群由下部的官山组、中部的过口组和上部的沪家垣组组成<sup>[2]</sup>(图 1), 各个岩组的岩性组合和上下关系与豫西地区的秦岭岩群一致. 本研究样品采自过口组的富铝质片麻岩. 该片麻岩位于太白县城西沪家垣村南约 1.5 km 的乡村公路旁, 露头宽度 5~15 m. 不同部位采集的样品其矿物含量变化较大, 如石榴石可从 5%变化至 30%或更高. 据 20 件岩石薄片的观察综合, 岩石总体具斑状变晶结构, 变质矿物有石榴石变斑晶、夕线石、红柱石、十字石、黑云母、白云母、斜长石和石英等. 石榴石变斑晶含港湾状他形十字石、柱状夕线石和石英等包裹体, 其中十字石被夕线石切割(图 2(a)). 基质中, 十字石包裹定向排列的石英包裹体, 红柱石包裹半自形黑云母叶片(图 2(b)). 柱状夕线石和港湾状十字石反应残留体, 局部见柱状夕线石和红柱石转变为毛发状的夕线石. 安三元等<sup>[2]</sup>曾在该类岩石中发现夕线石交代的蓝晶石残余. 综合考虑前人<sup>[2]</sup>的研究, 共生的矿物组合可以划分为 3 个世代: 第 1 世代为十字石+蓝晶石+石榴石+白云母+黑云母, 第 2 世代为柱状夕线石+石榴石+十字石(筛状变晶)+红柱石+黑云母+白云母, 第 3 世代为毛发状夕线石+白云母. 由于长

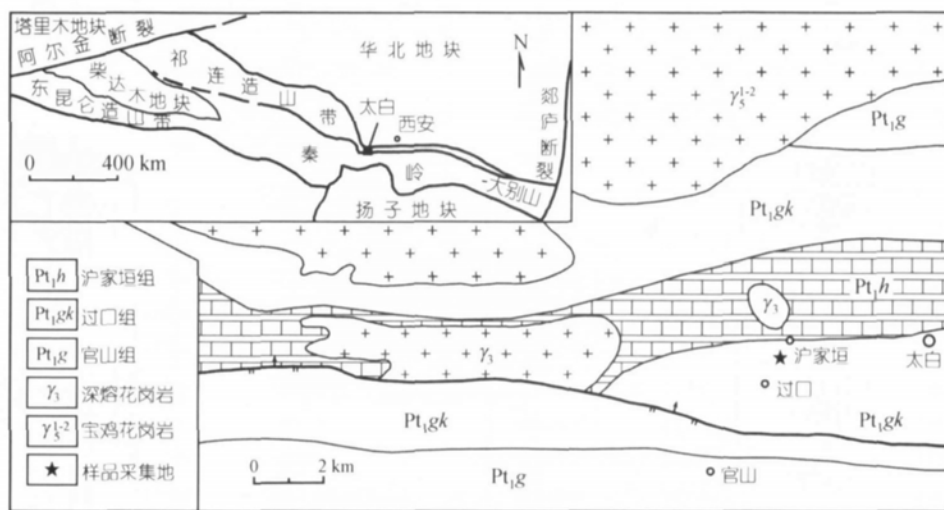


图 1 陕西太白地区地质略图(据安三元等<sup>[2]</sup> 修改, 插图据张国伟等<sup>[1]</sup>)

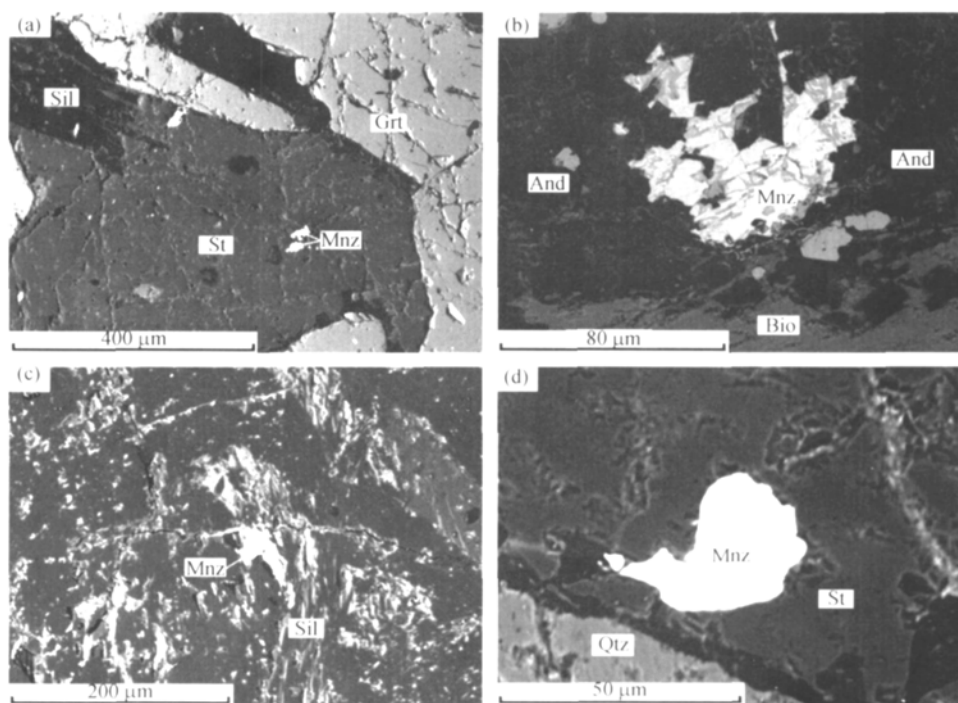


图 2 太白秦岭岩群富铝质片麻岩中独居石的背散射图像

(a) 第 一世代石榴石(Grt)中第 一世代十字石(St)中的独居石(Mnz)包裹体, 十字石具港湾状边缘, 被柱状夕线石(Sil)穿插; (b) 第 一世代红柱石(And)中的独居石包裹体; (c) 基质中与毛发状夕线石共生的独居石; (d) 基质第 一世代十字石中的独居石包裹体. 其他矿物代号: Bio-黑云母, Qtz-石英

英脉体不太发育, 推断第 一世代矿物组合的变质温度条件 650 . 独居石广泛见于基质的红柱石、夕线石、十字石和石榴石变斑晶中(图 2(b)~(d)), 偶见于包裹在石榴石变斑晶中的港湾状十字石包裹体中(图 2(a)). 薄片独居石粒径一般为 20~70  $\mu\text{m}$ .

### 3 测试结果

独居石 Th、U 和 Pb 的成分分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 JXA-8100 型电子探针仪上进行, 标样为  $\text{ThO}_2$ 、金属 U 和  $\text{PbCrO}_4$ , 加速电压 15 kV, 束流 100 nA, 束斑直径 1  $\mu\text{m}$ , Th, U 和 Pb

的峰位计数时间分别为 120, 180 和 270 s. 详细测定流程和叠加元素的校正见刘树文等<sup>[22]</sup>. 分析结果见表 1. 参照 Cocherie 等<sup>[15]</sup>的方法, 将 ThO<sub>2</sub>的分析结果

与电子探针对 ThO<sub>2</sub>的系统相对误差(1.72%)的乘积以及对 Pb 和 U 的检出限(分别为 85 和 171 μg/g(1σ))分别作为各元素的绝对误差值并代入年龄计算方程,

表 1 独居石电子探针分析结果

分析点号	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	年龄/Ma	分析点号	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	年龄/Ma
颗粒 1: 包裹于石榴石中的第 世代十字石中, 15 μm×30 μm					颗粒 4: 包裹于基质第 世代红柱石中, 50 μm×70 μm				
1	2.883	0.142	0.076	534±65	11	7.172	0.219	0.143	427±28
2	1.389	0.245	0.053	567±97	12	5.000	0.659	0.128	422±30
3	1.446	0.337	0.063	579±83	13	4.057	0.255	0.093	448±44
4	5.481	0.166	0.127	496±37	14	4.947	0.346	0.116	450±36
5	5.673	0.179	0.133	500±35	15	3.047	0.274	0.080	478±55
6	2.811	0.224	0.076	505±61	16	5.887	0.667	0.143	418±27
7	4.598	0.188	0.110	496±42	17	11.463	0.418	0.239	439±18
8	2.292	0.257	0.076	570±68	18	18.039	1.345	0.380	400±11
颗粒 2: 与基质第 世代毛发状夕线石共生, 25 μm×65 μm					19	16.864	0.856	0.354	425±13
1	4.388	0.465	0.117	466±37	20	7.476	0.224	0.149	428±27
2	4.004	0.387	0.098	439±41	21	8.961	0.350	0.182	425±22
3	4.264	0.607	0.110	416±35	22	11.512	0.477	0.246	444±18
4	4.624	0.558	0.120	439±34	23	9.326	0.264	0.188	435±22
5	5.498	0.516	0.130	427±30	24	7.208	0.288	0.151	437±27
6	6.263	0.438	0.140	429±29	25	4.818	1.295	0.156	407±24
7	5.727	0.705	0.149	437±27	颗粒 5: 包裹于第 世代斜长石和石英中, 15 μm×27 μm				
8	5.631	0.690	0.147	440±28	1	3.914	0.136	0.076	412±50
9	5.701	0.696	0.151	446±27	2	4.127	0.244	0.098	469±44
10	5.269	0.688	0.146	458±29	3	5.325	1.015	0.164	447±25
颗粒 3: 包裹于第 世代石榴石斑晶中, 15 μm×20 μm					4	4.503	0.732	0.129	441±31
1	3.142	0.143	0.064	418±60	5	4.133	0.694	0.123	453±34
2	3.030	0.142	0.061	412±62	6	4.027	0.732	0.130	477±34
3	2.575	0.146	0.051	395±71	7	4.172	0.875	0.145	485±31
4	3.208	0.318	0.076	423±51	8	4.206	0.881	0.138	459±30
5	3.404	0.389	0.093	468±46	9	4.099	0.836	0.123	425±32
6	3.074	0.142	0.062	413±61	10	5.074	0.837	0.146	441±28
7	3.613	0.115	0.074	437±54	颗粒 6: 包裹于基质第 世代十字石中, 20 μm×30 μm				
8	2.112	0.071	0.039	393±92	1	6.668	0.200	0.122	393±30
9	3.714	0.147	0.080	449±52	2	3.805	0.080	0.075	435±54
颗粒 4: 包裹于基质第 世代红柱石中, 50 μm×70 μm					3	6.184	0.152	0.127	448±33
1	8.382	0.205	0.197	512±25	4	6.246	0.149	0.121	424±33
2	5.244	0.178	0.111	449±38	5	4.951	0.128	0.103	452±41
3	5.766	0.531	0.133	418±29	颗粒 7: 与第 世代斜长石和石英共生, 45 μm×70 μm				
4	8.521	0.262	0.163	410±24	1	1.715	0.330	0.061	513±76
5	6.380	0.621	0.148	415±26	2	3.265	0.439	0.083	417±46
6	5.173	0.700	0.139	439±29	3	3.478	0.492	0.088	409±42
7	5.272	0.680	0.124	391±29	4	5.033	0.221	0.115	470±38
8	5.236	0.645	0.129	415±30	5	6.810	0.152	0.150	483±30
9	5.946	0.528	0.132	406±29	6	5.706	0.170	0.128	481±35
10	4.137	0.158	0.092	466±47	7	5.188	0.160	0.100	413±38

a) ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub> 和 PbO 的单位为 wt.%, 年龄及误差计算见正文

据 Montel 等<sup>[17]</sup>计算单个分析点表面年龄和绝对误差 ( $2\sigma$ ), 等时线年龄计算据 Suzuki 等<sup>[16]</sup>进行, 计算中对普通铅含量忽略不计. 表面年龄和等时线年龄计算用程序 ChemAge<sup>[23]</sup>完成.

由表 1 可见, 单个分析点年龄的绝对误差为 11~97 Ma ( $2\sigma$ ), 与国际上发表的相近电子探针化学年龄的误差一致<sup>[15,17,18]</sup>. 石榴石变斑晶中第 1 世代十字石包裹体中的独居石表面年龄分布在 496~579 Ma, 加权平均值为  $(512 \pm 24)$  Ma (用 Isoplot 2.90<sup>[24]</sup>计算, 下同). 第 1 世代石榴石变斑晶、基质十字石、红柱石、斜长石和石英中的独居石包裹体以及与第 1 世代夕线石共生的独居石的表面年龄主要集中在 410~450 Ma 之间, 加权平均年龄为  $(436 \pm 11)$  Ma. 应用等时线法对其分别处理, 得到第 1 世代十字石中独居石包体的等时线年龄为  $(520 \pm 23)$  Ma ( $2\sigma$ ), MSWD = 0.59 (图 3(a)), 其他包裹于第 1 世代或与第 1 世代变质矿物共生的独居石的等时线年龄为  $(435 \pm 9)$  Ma ( $2\sigma$ ), MSWD = 0.87 (图 3(b)). 等时线年龄与加权平均年龄在误差范围内一致. 近 80 Ma 的年龄间断表明它们分属两个变质作用期的产物.

#### 4 意义讨论

( ) 研究表明, 即便在麻粒岩相温度条件下, 30  $\mu\text{m}$  的独居石边上阶梯状 Pb 环带仍能保存完好, 表明独居石的 Pb 封闭温度极高<sup>[25]</sup>. 如果被石榴石包裹, 那么独居石将被有效屏蔽, 难以发生成分扩散或与外界矿物和流体发生反应, 因而可以保存早期的生长年龄<sup>[18,25,26]</sup>. 第 1 世代石榴石、红柱石、十字石、斜长石和石英中的独居石包体和与第 1 世代夕线石共生的独居石的年龄范围一致 ( $(435 \pm 9)$  Ma), 这表明: (1) 与这两个世代矿物组合共存的独居石属于同一期变质作用的产物; 或者 (2) 形成这两个世代矿物

的时间间隔太短, 所用方法难以检测. 由于所测的部分独居石颗粒包括在第 1 世代的石榴石和十字石中, 这一年龄至少代表了第 1 世代矿物的形成时间, 反映奥陶纪-志留纪的一期变质事件. 第 1 世代十字石中的独居石和它的寄主十字石被第 1 世代石榴石变斑晶包裹, 获得了双屏蔽作用, 因此第 1 ~ 1 世代矿物生长及其以后的地质事件对它的影响可以忽略不计, 其年龄反映了  $(520 \pm 23)$  Ma 的变质事件.

( ) 豫西秦岭岩群北侧的官坡一带, 含金刚石榴辉岩及围岩片麻岩超高压变质的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 507~493 Ma<sup>[6,7]</sup>, 南侧的商南深熔淡色脉体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(499.3 \pm 4.3)$  Ma<sup>[19]</sup>, 松树沟基性岩也存在  $(518 \sim 485)$  Ma 的变质作用和岩浆活动年龄<sup>[8~10]</sup>. 在中国西部的柴南缘和柴北缘-阿尔金都存在 ~500 Ma 的超高压榴辉岩和高压麻粒岩相的变质作用<sup>[11~13]</sup>. 这些证据共同表明中央造山带存在寒武纪 (约 500 Ma) 深俯冲和碰撞事件<sup>[6,7,8,11~13]</sup>. 太白秦岭岩群第 1 世代矿物组合生长于  $(520 \pm 23)$  Ma, 在误差范围内与上述中央造山带内 ~500 Ma 的事件在时间上一致, 表明是同一期构造热事件中的区域变质作用响应. 超高压成因的副片麻岩的存在<sup>[6,7,27,28]</sup>表明在 ~500 Ma 前沿现今的北秦岭-柴北缘-阿尔金高压超高压变质带一线曾发生过大陆深俯冲, 北秦岭微地块 (秦岭岩群) 和柴达木微地块与某些微地块已碰撞对接和汇聚.

( ) Wilde 等<sup>[29]</sup>据麻山杂岩存在 ~500 Ma 的变质作用和岩浆作用并通过孔兹岩系的对比, 认为中国东北的佳木斯地块曾经是冈瓦纳泛非造山带的一部分. 最近, 陆松年<sup>[14]</sup>建议用“泛华夏造山作用”取代我国长期使用的发生在 520~400 Ma 期间的加里东造山作用, 并认为中国 ~500 Ma 的构造热事件与 600~500

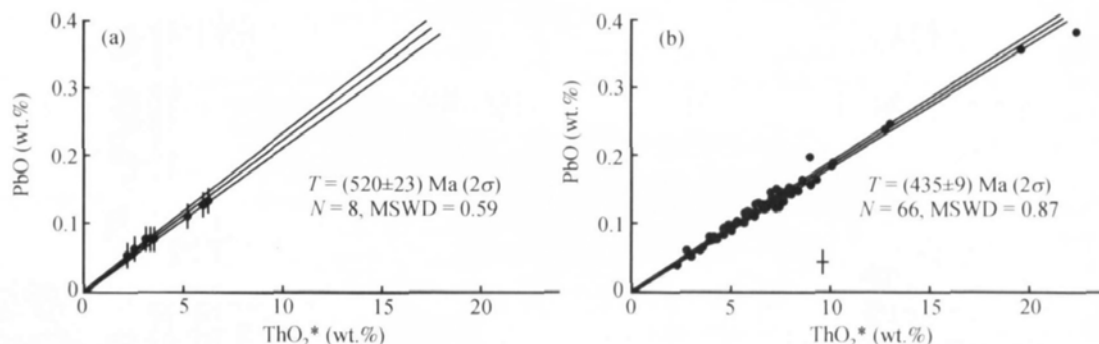


图 3 两个矿物世代相关的独居石 PbO-ThO<sub>2</sub>\*等时线图

(a) 第 1 世代 (石榴石中的十字石包裹体中的) 独居石; (b) 第 1 ~ 1 世代变质矿物中的独居石. 图中十字符号单点误差

Ma<sup>[30]</sup>泛非造山作用存在差异性。本文将发生在秦岭岩群和中央造山带部分地质体中~500 Ma 的变质事件称晚泛非期变质作用,以强调该事件与泛非造山晚期冈瓦纳大陆周缘的俯冲增生事件<sup>[31,32]</sup>在时间上的一致性。必须承认,古大陆的重建是一项相当复杂和困难的系统地质工程,目前已有的资料不足以证明中央造山带中记录~500 Ma 构造热事件的地质体确切属于冈瓦纳大陆的碎块,但这无疑将会为今后的工作提供一种新的思路。与泛非造山晚期相当的区域变质事件及其他事件群在中央造山带的陆续发现对中央造山带构造演化格局的再认识以及古大陆重建可提供重要约束。第 ~ 世代矿物组合对应于460~400 Ma 原特提斯洋关闭过程中的俯冲碰撞汇聚事件,本文不作详细讨论。

致谢 对评审者提出的意见与建议深表谢意。本研究受国家自然科学基金(批准号:40272030, 40234052)和教育部科技重点项目(批准号:104039)资助。

## 参 考 文 献

- 1 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 1—855
- 2 安三元, 胡能高. 北秦岭裂陷的形成与变质作用. 西安: 西北大学出版社, 1992. 1—63
- 3 游振东, 索书田, 韩郁菁, 等. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 166—313
- 4 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1994. 1—191
- 5 陈能松, 韩郁菁, 游振东, 等. 豫西东秦岭造山带核部杂岩全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 和单晶锆石 <sup>207</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb 计时及其地壳演化. 地球化学, 1991, 3: 219—227
- 6 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 2002, 76(4): 484—495
- 7 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据. 地质学报, 2003, 77(4): 463—477
- 8 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 2004, 49(18): 1901—1908
- 9 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约. 科学通报, 2004, 49(12): 1209—1211
- 10 刘军锋, 孙勇. 东秦岭松树沟超基性岩体“热”侵位时代新知. 地质论评, 2005, 51(2): 189—192
- 11 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄. 科学通报, 1999, 44(10): 1109—1112
- 12 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15(1): 57—64
- 13 陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 2002. 1—125
- 14 陆松年. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比. 地质通报, 2004, 23(9-10): 952—958
- 15 Cocherie A, Mezeme E B, Legendre O, et al. Electron-microprobe dating as a tool for determining the closure of Th-U-Pb systems in migmatitic monazite. Am Mineral, 2005, 90: 607—618
- 16 Suzuki K, Adachi M. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosaxa Paragneiss in the South Kitakani terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. Geochem J, 1991, 25: 357—376
- 17 Montel J M, Foret S, Veschambre M, et al. Electron microprobe dating of monazite. Chem Geol, 1996, 131: 37—53
- 18 Montel J M, Kornprobst J, Viezeuf D. Preservation of old U-Th-Pb ages in shielded monazite: example from the Beni Bousera Hercynian kinzigites (Morocco). J Metamorphic Geol, 2000, 18: 335—342
- 19 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 2003. 1—186
- 20 王涛, 张宗清, 王晓霞, 等. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定. 地质学报, 2005, 79(2): 220—232
- 21 张国伟, 于在平, 董云鹏, 等. 秦岭区前寒武纪构造格局与演化问题探讨. 岩石学报, 2000, 16(1): 11—21
- 22 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 等. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代. 高校地质学报, 2004, 10(3): 356—363
- 23 Geisler T. ChemAge: a 32-bit Windows program for chemical age calculations and the graphical data presentation. Beiheft Zum European J Mineralogy, 1999, 11: 154
- 24 Ludwig R K. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data (Version. 2. 90). US. Geological Survey Open File Rept, 1996, 91(445): 1—47
- 25 Zhu X K, O'Nions R K. Zonation of monazite in metamorphic rocks and its implications for high temperature thermochronology: a case study from the Lewisian terrain. Earth Planet Sci Lett, 1999, 171: 209—220
- 26 Catlos E J, Gilley L D, Harrison T M. Interpretation of monazite ages obtained via in situ analysis. Chem Geol, 2002, 188: 193—215
- 27 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报, 2001, 75(2): 175—179
- 28 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩“原地”关系的证据. 中国科学, D 辑: 地球科学, 2004, 34(9): 825—834
- 29 Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Lennon R G. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi Massif: An exotic fragment of Gondwanaland located in North-Eastern China? Gondwana Res, 1999, 2: 21—46
- 30 Santosh S, Yoshida M. Pan-African extensional collapse along the Gondwana suture. Gondwana Res, 2001, 4(2): 188—191
- 31 Hensen B J, Zhou B. A Pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: evidence from Sm-Nd garnet dating. Aust J Earth Sci, 1995, 42(3): 249—258
- 32 Vincenzo G D, Palmeri R, Talarico F, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctic. J Petrol, 1997, 38(10): 1391—1417

(2006-03-28 收稿, 2006-07-07 接受)