

东秦岭河南伊川-湖北宜昌地学断面 地壳岩石组成、化学成分及形成机制

Petrological Model, Chemical Composition and Possible Genesis of the Crust Along Yichuan-Yichang Global Geoscience Transect (GGT) in East Qinling

高山 赵志丹 骆庭川 张本仁

Gao Shan, Zhao Zhidan, Luo Tingchuan and Zhang Benren

(中国地质大学地球化学研究所 武汉 430074)

(*Institute of Geochemistry, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*)

摘要 系统测定了河南伊川-湖北宜昌地学断面及其邻区主要岩性 99 件样品高温高压条件下地震纵波速 V_p 值, 将结果与地表地质、地震测深获得的地壳速度结构资料相结合, 建立了研究区内四个构造单元地壳岩石组成模型, 估算出地壳各层的平均成分。秦岭地壳总体成分是闪长-花岗闪长质的, 地壳分异程度较低, 地壳成分和地球物理研究结果表明, 秦岭造山带在其发展过程中可能存在过板底垫托物质, 但拆离作用已使现今造山带不存在山根, 垫托物质很少或已返回上地幔。

Abstract On the basis of geochemical study, laboratory study of seismic velocity (V_p) of 99 rock samples at high temperatures and high pressures, geological study, and the QB-1 Multiple Sounding Section of the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China Craton and Yangtze Craton, the models of petrological structure and composition in the four structural units have been established. The results imply that the regional crust, which proposed to be granodioritic to quartz-dioritic in composition, is poorly differentiated. It is possible that mafic underplating at the base of the crust might have occurred, but the delamination has indeed played an important role in the past time in the Qinling Orogenic Belt.

主题词 地学断面 地壳组成 地震波速 拆离作用 秦岭

Key Words: GGT; Crustal composition; Seismic velocity; Delamination; Qinling Orogenic Belt

• 本文 1994 年 9 月 16 日收到, 1994 年 10 月 20 日改回。

本文为国家自然科学基金委员会资助项目(编号 49290100)成果之一。

第一作者简介: 高山 男 1962 年出生 教授 地球化学专业

分类号: P315.2; P542.5

Classific. code: P315.2; P542.5

1 引言

由国际岩石圈委员会发起和组织的全球地学断面计划(GGT)自八十年代中期在全球范围内实施以来,短短十年就取得了惊人的成果,加深了对大陆岩石圈的全面了解(吴其斌等1991)。目前已完成的地学断面都以深部地球物理探测为主要内容,配合地质地球化学的综合研究尚不多见。而地球化学的限制会有助于对断面的许多问题的认识,因此地质、地球物理和地球化学等多学科研究相结合,已成为岩石圈深入研究的一个特点。以断面走廊带(或包括其邻区)为范围的断面地球化学研究至少包括:(1)岩石圈的结构及其组成(如岩石学模型、地球化学模型及热结构模型等);(2)岩石圈的综合地球化学研究(如岩石地球化学、成矿作用地球化学等)。归结起来,岩石圈的结构和物质组成是根本问题。由于岩石圈垂向和横向的不均一性(尤其复杂的造山带),建立精确和统一的结构和组成模型十分困难,至多只能得到满足于较多限制条件的和较逼近实际的结果。岩石圈的深部物质组成与状态研究主要从超深钻、综合地球物理深部探测和地质地球化学(如出露地表的地壳断面、深源包体、岩石物性、岩浆源区研究等)三个方面入手,但针对具体地区来说,研究方法又是有限的。

秦岭造山带近十几年来虽然在地质、地球物理和地球化学方面取得了长足的进展(张国伟等1988;刘国惠,张寿广1990;叶连俊等1991;刘国惠等1993;周国藩等1992;曹家敏等1994;张本仁等1987;1989;1990;1994;高山,张本仁1993;高山等1991;Gao et al. 1990;1991;1992),已有成果为秦岭地学断面的地球化学研究提供了可能,但是总的来看,现有的地球物理资料仍不丰富,特别是本区岩浆岩中缺少深源地壳包体,为深入研究带来了困难。本文将北起河南省伊川县,经嵩县、栾川县、西峡县、淅川县、湖北省郧县、十堰市、房县、神农架、秭归县,南到宜昌市这条跨越了华北地台南缘、北秦岭、南秦岭和扬子地台北缘四个构造单元的剖面做为地学断面的中线,向东西延伸共宽100km作为断面走廊带,本文以该走廊带及其东西相邻地区(即东秦岭及其邻区)作为研究范围,深度为整个地壳。在原有工作基础上,以研究区内岩石实验地震波速和地震测深资料的对比研究为主要证据,进一步确证了各构造单元的地壳岩石组成模型,并讨论了东秦岭地壳的化学成分及其可能的形成机制。

2 断面及其邻区岩石的高温高压实验地震波速特征

2.1 样品的采集和测试

为了解释地震测深结果,更好地推测深部物质的组成,Birch(1961),Christensen et al.(1975),Fountain et al.(1976;1989;1990),Burke et al.(1990),Drummond et al.(1982,1988),Kern et al.(1985;1988;1993a,b),吴宗絮等(1991;1992;1994),张友南等(1993)和刘庆生等(1994)等国内外许多研究者都对岩石在高压、高温高压下的地震波速进行过研究和应用。本次研究系统地采集了秦岭造山带及其邻区(即本文的断面及其邻区)基底

和花岗岩体代表性岩石样品, 完成了岩石在高压 (28 件, 部分结果见刘庆生等 1994, 本文不再讨论) 和高温高压 (71 件) 两种条件下的纵波速 V_p 测定。除 3 件太华群麻粒岩样品的高压波速测定在美国怀俄明大学 D. M. Fountain 教授主持的实验室中测定外, 其余 96 件样品均在中国科学院地球化学所地球深部物质研究室测定。实验在 YJ3000 吨六面顶高压装置上完成。样品加工成直径 11mm、长 33mm 的圆柱体, 以不锈钢片做加热器, 以叶腊石做传压介质。实验控制的最高 P 、 T 条件为 3GPa 和 $>1000^{\circ}\text{C}$ 。实验方法详见谢鸿森等 (1993)。实验样品通过质量和体积的精确测定得出密度。高温高压波速测定后的实验产物均磨制了薄片并作镜下鉴定。所有样品均配有岩石化学分析 (由湖北省地质实验研究所测定)。

在实验方案上, 没有照搬上述的研究者在单独升压、恒温升压或者恒压升温的实验条件下测定岩石波速的一贯作法, 而是模拟地壳向深部地温和地压都增加的实际情况, 采用温压同步增加的条件下测定样品波速的方案。依据各构造单元的不同地温分布曲线 (高山, 张本仁 1993) 给出的 P 、 T 对应关系, 采取 P 、 T 同步增加的方法, 测出每个样品在一系列 P 、 T 状态下的 V_p 值。取地壳压力梯度为 0.03GPa/km, 将压力换算成深度 D 。实验样品采自的地质体、岩性、密度和实验 V_p 结果按构造单元分别列入表 1~5 中, 其中代表性样品的 V_p - D ($D \leq 35\text{km}$) 曲线见图 1 和图 2。

表 1 华北地台南缘岩石高温高压实验 V_p 值 (km/s)

Table 1 The experiment V_p values of rocks from southern margin of the North China craton under high T - P (km/s)

深度 $D(\text{km})$	压力 $P(\text{GPa})$	温度 $T(^{\circ}\text{C})$	花 岗 岩 类						
			1	2	3	4	5	6	7
4	0.12	140	5.51	4.87	5.18	5.20	4.32	5.19	5.37
5	0.15	160	5.63	4.92	5.27	5.34	4.65	5.37	5.36
7	0.21	190	5.60	5.28	5.38	5.48	5.05	5.56	5.57
8	0.24	220	5.70	5.54	5.47	5.49	5.20	5.64	5.69
9	0.27	250	5.69	5.58	5.46	5.56	5.48	5.69	5.68
10	0.30	280	5.70	5.60	5.58	5.66	5.54	5.68	5.68
11	0.33	310	5.83	5.63	5.60	5.72	5.67	5.74	5.73
12	0.36	350	5.96	5.66	5.63	5.78	5.75	5.80	5.73
14	0.42	390	5.95	5.65	5.70	5.81	6.03	5.84	5.73
15	0.45	420	6.04	5.80	5.75	5.85	6.02	5.86	5.82
18	0.54	500	6.13	5.93	5.80	5.92	6.01	6.04	5.88
20	0.60	550	6.14	5.96	5.81	5.95	6.13	6.12	5.89
22	0.66	590	6.24	6.04	5.82	5.99	6.13	6.13	5.88
25	0.75	650	6.26	6.07	5.83	6.02	6.12	6.13	6.03
27	0.81	700	6.27	6.07	5.84	6.06	6.10	6.14	6.12
30	0.90	750	6.27	6.12	5.96	6.19	6.12	6.20	6.10
32	0.96	800	6.27	6.18	6.08	6.24	6.11	6.25	6.22
35	1.05	860	6.25	6.30	6.14	6.27	6.10	6.34	6.20
密度 (g/cm^3)			2.80	2.72	2.65	2.67	2.70	2.67	2.68

* 花岗岩 采样的岩体名称是: 1 板山坪; 2 翠华山; 3. 老君山; 4, 5 伏牛山; 6. 洛宁花山; 7 龙王庙

表2 北秦岭岩石高温高压实验 V_p 值(km/s)
Table 2 The V_p values of rocks from the North Qinling
Orogenic Belt under high T - P experiment condition (km/s)

D (km)	P (GPa)	T ($^{\circ}$ C)	秦 岭 群								宽 坪 群			二 朗 坪 群	花 岗 岩				
			8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3	0.09	140	5.11					4.77 5.54 5.19 5.69			5.35		4.99 4.68			4.95 5.33 4.45 5.17			
3.5	0.11	160	5.24 4.83 4.86 5.61 5.56 5.79 5.18 5.55									5.05 4.81 5.20		4.85	5.01 5.40 4.50 5.23				
4	0.12	190	4.65 5.29 4.85 5.10 5.65 5.62 5.97 5.30 5.95									5.20 4.84 5.36		4.85	5.10 5.48 4.55 5.27				
5	0.15	220	5.26 5.45 5.00 6.02 5.84 5.83 6.16 5.68 6.11									5.61 5.22 5.55		5.45	5.12 5.55 4.82 5.40				
6	0.18	250	5.59 5.55 5.07 6.55 6.03 5.94 6.27 5.88 6.25									5.64 5.30 5.67		5.64	5.22 5.66 4.95 5.47				
7	0.21	280	5.93 5.71 5.20 6.68 6.12 6.16 6.39 5.96 6.48									5.72 5.50 5.83		5.83	5.28 5.65 5.25 5.47				
8	0.24	350	6.06 5.70 5.30 6.94 6.17 6.20 6.52 6.10 6.61									5.93 5.66 6.06		6.06	5.34 5.76 5.32 5.51				
9	0.27	390	6.12 5.76 5.35 7.00 6.16 6.35 6.66 6.18 6.74									5.97 5.72 6.05		6.04	5.41 5.77 5.48 5.62				
10	0.30	420	6.23 5.79 5.40 7.05 6.22 6.39 6.71 6.28 6.79									6.03 5.75 6.04		6.05	5.51 5.77 5.49 5.62				
12	0.36	470	6.46 5.82 5.48 7.14 6.21 6.48 6.75 6.36 6.92									6.12 5.78 6.07		6.26	5.66 5.84 5.52 5.66				
13	0.39	500	6.53 5.86 5.51 7.34 6.20 6.55 6.77 6.35 6.97									6.18 5.86 6.22		6.29	5.65 5.83 5.62 5.77				
14	0.42	550	6.63 5.91 5.61 7.40 6.19 6.60 6.82 6.39 7.10									6.25 5.90 6.23		6.34	5.65 5.90 5.67 5.79				
16	0.48	590	6.70 6.02 5.61 7.42 6.17 6.63 6.89 6.48 7.14									6.29 5.92 6.33		6.32	5.78 5.88 5.70 5.84				
18	0.54	650	6.73 6.07 5.66 7.43 6.15 6.67 6.94 6.50 7.15									6.41 5.98 6.34		6.37	5.79 5.87 5.77 5.91				
20	0.60	700	6.73 6.06 5.69 7.57 6.21 6.75 6.99 6.58 7.24									6.42 6.02 6.49		6.43	5.89 5.88 5.94 5.90				
22	0.66	750	6.78 6.08 5.76 7.58 6.23 6.78 6.97 6.65 7.28									6.49 6.04 6.51		6.49	5.88 6.01 5.92 5.89				
24	0.72	800	6.82 6.14 5.79 7.56 6.35 6.86 6.96 6.68 7.26									6.53 6.07 6.51		6.53	5.86 6.00 5.91 5.88				
26	0.78	860	6.86 6.14 5.85 7.53 6.30 6.91 6.97 6.79 7.24									6.52 6.13 6.58		6.63	5.92 6.09 5.90 5.89				
29	0.87	920	6.96 6.23 5.87 7.55 6.16 6.91 6.88 6.77 7.21									6.43 6.11 6.59		6.66	6.08 6.18 5.87 6.00				
32	0.96	980	6.93 6.40 6.05 7.52 6.01 6.92 6.80 6.77 7.19									6.40 6.08 6.57		6.64	6.14 6.19 5.85 6.05				
34	1.02	1040	6.44 6.01 7.30 5.83 6.92 6.57 6.60 7.18									6.39 6.06 6.68		6.44	6.23 6.17 5.84 6.12				
密度(g/cm^3)			3.00	2.74	2.78	2.90	2.69	3.03	2.95	3.03	3.06	3.02	2.70	2.92	2.95	2.67	2.70	2.74	2.72

8、9、10 为斜长片麻岩；11、12 大理岩；13、14、15、16、17 为斜长角闪岩；18 为云母石英片岩；19 为大理岩；20 为变基性火山岩；21~24 的岩体名称分别为二郎坪、太平镇、漂池、五朵山。

2.2 岩石在高温高压条件下的实验地震波速特征

表 1~5 的数据和图 1、图 2 所绘曲线表明，研究区内岩石实验 V_p 具有如下特征：(1) 随深度增加，各类岩石的 V_p 在 0~10km 范围内都迅速增大；在 10~35km 范围内， V_p 虽仍有增加但幅度减弱，在该范围内几乎所有样品都达到了 V_p 极大值。这表明 10km(0.3GPa) 时岩石的微裂隙已基本闭合，10~35km 范围内 V_p 值的差异才能真正代表了岩石类型的差异。(2) 超过半数样品 V_p 是随 D 增加而单调增大或趋近于某一恒定值，但也有一部分样品在 21~35km 范围内出现 V_p 低谷，暂称之为纵波低速现象(详见另文讨论)。(3) 各类岩石在 21~35km 范围内所达到的 V_p 极大值是不同的，基性麻粒岩、斜长角闪岩、大理岩和含有角闪石或辉石的片岩可达 6.6~7.6km/s(相应的密度均 $>2.80gcm^{-3}$)，酸性麻粒岩，变火山岩、花岗岩、花岗片麻岩、混合岩、云母石英片岩和磁铁石英岩等介于 5.8~6.6km/s(除磁铁石英岩密度为 3.74 外，均介于 2.60~2.80 gcm^{-3})。岩石的 V_p 与密度具较好的正相关关系，同时与岩石变质程度和化学成分也有一定的关系，表现为角闪岩相和麻粒岩相(基性麻粒岩)岩石明显高于低角闪岩相、绿片岩相及未变质的岩石，基性成分岩石的变质程度升高其 V_p 随之增

大, 而中酸性岩类则不同, 其所受变质作用强弱几乎不影响 V_p 的大小; 相同变质等级的岩石, V_p 大小与 SiO_2 含量呈反相关, 大理岩特别高的 V_p 值与其 CaO 含量较高有关。这些规律与前述众多研究者所获结果基本一致。

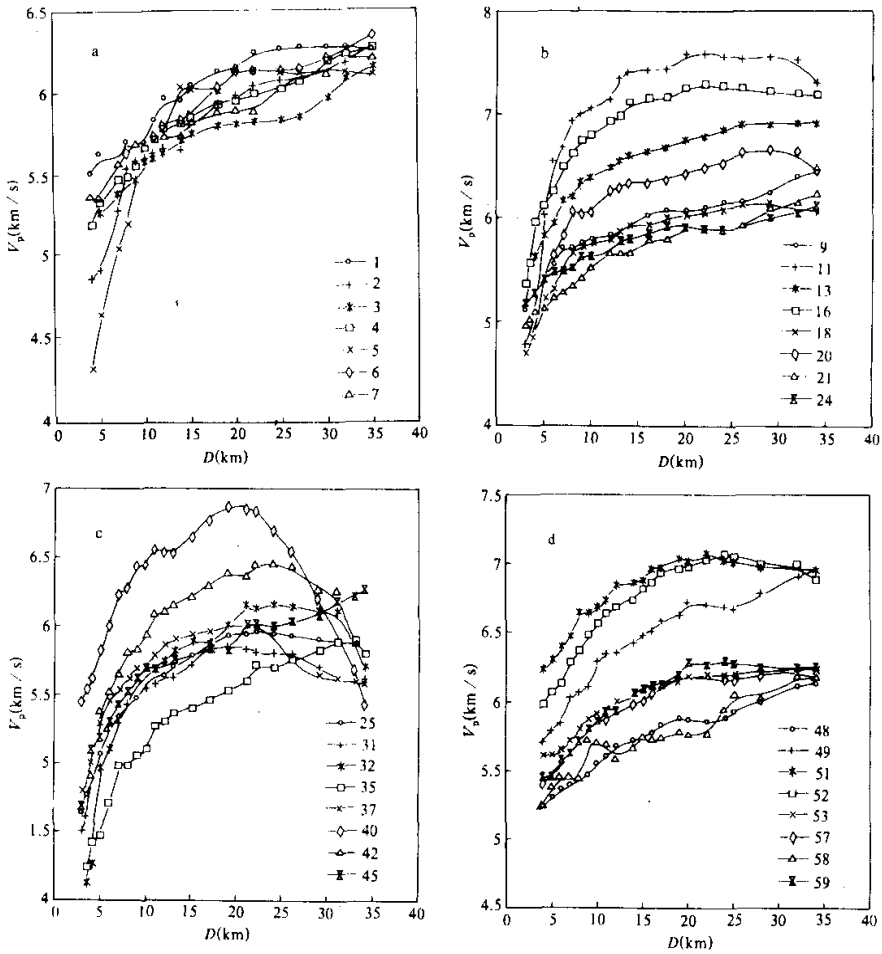


图 1 伊川-宜昌地学断面及其邻区岩石 V_p - D 曲线
 (图中样号参见表 1~4); a. 华北地台南缘; b. 北秦岭; c. 南秦岭; d. 扬子地台北缘;
 Fig. 1 V_p - D curves of rocks from Yichuan-Yichang GGT and its adjacent regions

3 断面及其邻区地壳的岩石组成模型

3.1 华北地台南缘

详细的地质、地球化学和地球物理研究证明, 出露于河南登封-鲁山一带的高角闪岩相-

表3 南秦岭岩石高温高压实验 V_p 值(km/s)Table 3 The V_p values of rocks from the South Qinling Orogenic Belt under high T - P (km/s)

D (km)	P (GPa)	T ($^{\circ}$ C)	武当群					碧口群		郧西群					耀岭河群				鱼洞子群			震旦系		辉长岩		闪长岩		花岗岩				
			25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47							
3	0.09	140	4.64			4.79	5.67			4.50		5.42			4.98	4.78		4.75	5.45	5.11		5.17		4.68	5.07	5.33						
3.5	0.11	160	4.76		4.84	4.95	5.80			4.61	4.12	5.48		4.24	5.03	4.91	3.72	4.84	5.54	5.12	4.87	5.23	4.98	4.91	5.13	5.32						
4	0.12	190	4.83	4.98	4.92	5.07	5.88	5.47	4.84	4.25	5.47	4.57	4.42	5.07	4.99	3.98	4.90	5.62	5.22	4.91	5.27	5.03	5.11	5.18	5.38							
5	0.15	220	5.07	5.16	5.22	5.36	5.90	5.70	5.04	4.98	5.56	5.02	4.47	5.25	5.29	4.74	5.21	5.83	5.31	5.38	5.40	5.22	5.20	5.41	5.43							
6	0.18	250	5.25	5.26	5.36	5.51	6.08	6.07	5.24	5.10	5.63	5.45	4.70	5.39	5.46	5.02	5.35	6.00	5.48	5.52	5.47	5.44	5.31	5.44	5.48							
7	0.21	280	5.34	5.46	5.75	5.58	6.16	6.15	5.42	5.31	5.69	5.53	4.98	5.44	5.53	5.29	5.47	6.24	5.51	5.65	5.47	5.54	5.44	5.55	5.55							
8	0.24	350	5.42	5.55	5.84	5.81	6.22	6.37	5.41	5.44	5.72	5.73	4.98	5.56	5.61	5.49	5.58	6.28	5.55	5.81	5.51	5.54	5.53	5.68	5.58							
9	0.27	390	5.47	5.63	5.88	5.80	6.21	6.38	5.49	5.61	5.77	5.87	5.06	5.59	5.69	5.59	5.65	6.44	5.62	5.83	5.62	5.67	5.63	5.74	5.61							
10	0.30	420	5.61	5.71	6.03	5.81	6.20	6.42	5.55	5.60	5.80	5.97	5.10	5.70	5.68	5.77	5.85	6.45	5.62	5.93	5.62	5.68	5.70	5.78	5.63							
11	0.33	470	5.62	5.81	6.10	5.89	6.19	6.44	5.58	5.75	5.84	6.09	5.27	5.71	5.78	5.78	5.84	6.56	5.69	6.09	5.64	5.67	5.69	5.77	5.66							
12	0.36	500	5.63	5.80	6.23	5.99	6.26	6.48	5.64	5.74	5.82	6.18	5.30	5.72	5.86	5.77	5.85	6.54	5.68	6.10	5.66	5.69	5.71	5.78	5.70							
13	0.39	550	5.71	5.85	6.22	6.06	6.30	6.55	5.63	5.82	5.86	6.24	5.37	5.73	5.90	5.75	5.82	6.54	5.68	6.15	5.77	5.88	5.75	5.79	5.76							
15	0.45	590	5.78	5.87	6.28	6.09	6.34	6.53	5.72	5.89	5.88	6.50	5.40	5.80	5.93	5.82	5.85	6.65	5.66	6.21	5.82	5.86	5.77	5.89	5.77							
17	0.51	650	5.87	5.94	6.36	6.11	6.85	6.52	5.87	5.87	5.89	6.47	5.46	5.85	5.96	5.92	5.88	6.78	5.87	6.29	5.88	5.84	5.84	5.90	5.78							
19	0.57	700	5.93	6.02	6.57	6.15	6.33	6.50	5.85	6.01	5.92	6.50	5.53	5.90	6.01	5.90	5.89	6.88	6.10	6.38	5.90	5.92	5.83	6.00	5.88							
21	0.63	750	5.95	6.12	6.54	6.20	6.31	6.47	5.84	6.15	5.94	6.53	5.60	5.93	5.99	6.00	5.95	6.86	6.25	6.36	5.89	6.00	6.02	6.04	5.99							
22	0.66	800	5.97	6.22	6.33	6.27	6.30	6.21	5.82	6.13	5.98	6.65	5.72	5.92	5.98	5.99	5.94	6.84	6.24	6.44	5.89	5.99	6.02	6.08	6.03							
24	0.72	860	5.95	6.28	6.04	6.30	6.46	6.08	5.81	6.17	6.01	6.62	5.70	5.90	5.97	6.12	5.92	6.69	6.22	6.45	5.88	6.08	6.00	6.06	6.09							
26	0.78	920	5.94	6.25	5.93	6.28	6.50	5.63	5.80	6.15	6.04	6.60	5.76	5.89	5.74	6.24	5.88	6.55	6.21	6.43	5.89	6.06	6.04	6.05	6.13							
29	0.87	980	5.91	6.23	5.88	6.31	6.31	5.39	5.71	6.12	6.14	6.64	5.83	5.87	5.65	6.32	5.86	6.21	6.18	6.26	6.00	5.99	6.09	6.02	6.14							
31	0.93	1040	5.89	6.11	5.54	6.32	5.85	5.38	5.61	6.11	6.26	6.62	5.89	5.79	5.61	6.33	5.84	5.90	6.17	6.25	6.05	5.78	6.18	6.01	6.15							
33	0.99	1100	5.89	5.99	5.53	6.30	5.72	5.37	5.60	5.87	6.22	6.60	5.90	5.78	5.60	6.31	5.83	5.69	6.00	5.88	6.08	5.68	6.22	6.02	6.33							
34	1.02	1160		5.98	5.53	6.30	5.63	5.36	5.62	5.70	6.08	6.36	5.80	5.61	5.59	6.31		5.43	5.92		6.12	5.67	6.27	6.01	6.33							
密度(g/cm ³)			2.63	2.64	3.01	2.77	2.76	3.05	2.89	2.92	2.71	3.02	2.75	3.03	3.07	3.74	2.94	3.06	2.76	2.93	2.71	2.83	2.69	2.82	2.70							

25、26. 变碎屑岩; 27. 变酸性火山岩; 28、29、30、31、32. 变基性火山岩; 33. 变酸性火山岩; 34、35. 斜长片麻岩; 36. 花岗岩片麻岩; 37. 斜长角闪岩; 38. 磁铁矿石英岩; 39. 采自城固双溪含石榴石片麻岩; 40~47. 的岩体名称依次为: 毕梯沟、西岔河、甘沟、霸王寨、封子山、老虎沟、三坪沟、五龙。

麻粒岩相太华群(下地壳)、角闪岩相登封群(中地壳)和上覆绿片岩相—未变质的早元古—显生宙岩石(上地壳)代表了华北地台南缘的一条晚太古代地壳断面(Liu and Gao 1992; 刘庆生, 高山等 1993a; 1993b; 1994)。它是否可以代表现今华北地台南缘的地壳的岩石组成呢? 将太华群、登封群岩石的高压 V_p 实验结果通过温度校正至下地壳和中地壳的 P 、 T 条件, 得到其 V_p 分别为 6.5~6.8km/s 和 5.8~6.0km/s, 花岗岩高温高压 V_p 结果(表 1)在上、中地壳平均为 5.47 和 5.96km/s, 而 QB-1 地震测深结果(袁学诚 1991; 周国藩等 1992; 曹家敏等 1994; 下同)表明现今华北地台南缘地震 V_p 在下地壳为 6.1~6.9km/s(平均 6.6), 中地壳为 5.9~6.2km/s(平均 5.92), 上地壳为 5.6~6.07km/s。波速对比证明, 太华群和登封群可以分别代表华北地台南缘现今的下地壳和中地壳, 而花岗岩则是中、上地壳的组成部分。利用岩石生热元素 U、Th、K 估算该区地表热流值为 79mWm^{-2} , 与平顶山地区实测值($72\sim 76\text{mWm}^{-2}$)一致(高山, 张本仁 1993)。

表 4 扬子地台北缘岩石高温高压实验 V_p 值(km/s)
Table 4 The experiment V_p values of rocks from northern margin of the Yangtze Craton under high T - P (km/s)

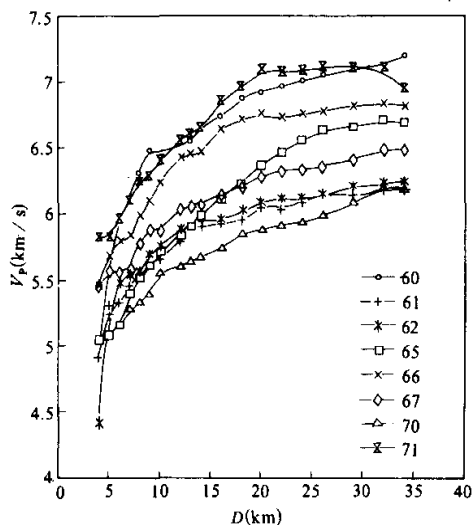
D (km)	P (GPa)	T (°C)	崆 岭 群					花 岗 岩 类						
			48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
4	0.12	140	5.23	5.70	5.91	6.23	5.98	5.60	5.25	5.54	5.00	5.40	5.24	5.45
5	0.15	160	5.30	5.79	5.96	6.30	6.07	5.60	5.24	5.61	5.13	5.44	5.37	5.45
6	0.18	190	5.36	5.84	6.10	6.38	6.12	5.65	5.33	5.65	5.26	5.55	5.45	5.58
7	0.21	220	5.40	6.03	6.14	6.47	6.28	5.70	5.40	5.72	5.42	5.63	5.45	5.63
8	0.24	250	5.43	6.06	6.36	6.64	6.36	5.79	5.49	5.74	5.42	5.71	5.44	5.71
9	0.27	280	5.46	6.10	6.36	6.63	6.48	5.87	5.58	5.80	5.53	5.79	5.71	5.81
10	0.30	350	5.55	6.29	6.34	6.68	6.56	5.90	5.68	5.86	5.59	5.87	5.70	5.86
11	0.33	390	5.60	6.34	6.44	6.73	6.63	5.94	5.79	5.85	5.68	5.86	5.69	5.92
12	0.36	420	5.68	6.35	6.48	6.84	6.68	5.98	5.78	5.85	5.65	5.92	5.68	5.93
14	0.42	470	5.71	6.42	6.58	6.85	6.73	6.01	5.81	5.90	5.70	5.98	5.66	6.06
15	0.45	500	5.74	6.48	6.57	6.87	6.81	6.05	5.87	5.97	5.75	5.99	5.74	6.09
16	0.48	550	5.77	6.50	6.67	6.96	6.86	6.14	5.98	5.98	5.79	6.06	5.72	6.11
17	0.51	590	5.83	6.58	6.75	6.97	6.93	6.13	5.97	5.98	5.80	6.12	5.73	6.12
19	0.57	650	5.88	6.62	6.82	7.02	6.96	6.14	6.00	6.01	5.88	6.16	5.77	6.19
20	0.60	700	5.87	6.72	6.81	7.00	6.97	6.17	6.04	6.03	5.89	6.17	5.76	6.28
22	0.66	750	5.85	6.70	6.79	7.05	7.02	6.18	6.03	6.04	5.90	6.17	5.76	6.26
24	0.72	800	5.88	6.68	6.76	7.03	7.06	6.18	6.03	6.05	5.93	6.16	5.94	6.29
25	0.75	860	5.94	6.67	6.75	7.01	7.05	6.19	6.05	6.12	6.03	6.15	6.04	6.27
28	0.84	920	6.00	6.77	6.72	6.98	6.99	6.22	6.13	6.18	6.00	6.20	6.02	6.24
32	0.96	980	6.12	6.90	6.69	6.95	6.99	6.25	6.16	6.16	6.19	6.22	6.18	6.24
34	1.02	1040	6.15	6.95	6.67	6.93	6.87	6.23	6.20	6.14	6.17	6.16	6.17	6.25
密度(g/cm ³)			2.67	2.87	3.08	3.32	3.19	2.78	2.79	2.74	2.70	2.80	2.72	2.80

48,49 为长石石英片岩; 50,51,52 为斜长角闪岩; 53,54 为黄酸花岗岩; 55 为二里坝斜长花岗岩; 56 为圈倚塘钾长花岗岩; 57 为三斗坪石英闪长岩; 58 为铁船山霓石花岗岩; 59 为晓峰花岗斑岩。

表5 桐柏-大别造山带岩石高温高压实验 V_p 值(km/s)Table 5 The experiment V_p values of rocks from the Tongbo-Dabie Orogenic Belt under high T - P (km/s)

D (km)	P (GPa)	T ($^{\circ}$ C)	大河群				大别群							红安群
			60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
4	0.12	190	4.92	4.92	4.41	5.75	5.22	5.05	5.45	5.45	4.75	5.93	5.03	5.82
5	0.15	220	5.56	5.24	5.31	5.84	5.33	5.08	5.67	5.57	4.89	6.27	5.07	5.83
6	0.18	250	5.97	5.33	5.48	5.85	5.51	5.16	5.79	5.56	4.88	6.40	5.13	5.97
7	0.21	280	6.10	5.45	5.54	5.87	5.57	5.39	5.83	5.59	5.02	6.50	5.28	6.10
8	0.24	350	6.31	5.55	5.56	5.95	5.64	5.52	5.98	5.78	5.15	6.60	5.33	6.25
9	0.27	390	6.49	5.61	5.69	5.99	5.72	5.61	6.09	5.88	5.21	6.71	5.39	6.29
10	0.30	420	6.45	5.66	5.75	6.02	5.81	5.71	6.23	5.87	5.27	6.70	5.56	6.41
12	0.36	470	6.54	5.78	5.88	6.13	5.85	5.83	6.42	6.03	5.37	6.83	5.60	6.56
13	0.39	500	6.54	5.89	5.91	6.19	5.92	5.90	6.44	6.05	5.42	6.87	5.64	6.61
14	0.42	550	6.68	5.91	5.95	6.22	5.86	5.98	6.46	6.06	5.47	6.91	5.67	6.65
16	0.48	590	6.72	5.93	5.95	6.26	5.92	6.11	6.63	6.14	5.51	6.95	5.74	6.86
18	0.54	650	6.88	5.93	6.02	6.33	5.99	6.22	6.71	6.20	5.59	7.02	5.85	6.96
20	0.60	700	6.92	6.06	6.08	6.34	5.95	6.37	6.75	6.29	5.61	7.06	5.88	7.09
22	0.66	750	6.96	6.03	6.11	6.34	6.09	6.46	6.73	6.33	5.61	7.11	5.91	7.07
24	0.72	800	7.00	6.09	6.11	6.34	6.07	6.56	6.75	6.34	5.73	7.09	5.94	7.08
26	0.78	860	7.05	6.15	6.14	6.34	6.13	6.63	6.77	6.36	5.74	7.03	5.99	7.11
29	0.87	920	7.09	6.12	6.20	6.35	6.14	6.66	6.81	6.42	5.76	6.97	6.09	7.10
32	0.96	980	7.13	6.18	6.23	6.35	6.20	6.71	6.83	6.50	5.87	6.95	6.21	7.10
34	1.02	1040	7.19	6.19	6.24	6.36	6.30	6.69	6.81	6.49	5.86	6.76	6.19	6.95
密度(g/cm ³)			3.32	2.85	2.81	2.82	2.70	2.89	3.13	2.77	2.80	2.87	2.66	3.3

60. 基性麻粒岩; 61,62,63. 酸性麻粒岩; 64. 黑云斜长片麻岩; 65. 角闪黑云辉石麻粒岩; 66. 石榴二辉麻粒岩; 67. 鲤鱼寨英云闪长岩; 68. 变泥质粉砂岩; 69. 大理岩; 70. 黑云斜长片麻岩; 71. 侵入红安群的榴闪岩.

图2 桐柏-大别造山带岩石 V_p - D 曲线

图例中样号 60,61,62,65,66,67,70,71 见表 5

Fig. 2 V_p - D curves of rocks from the Tongbo-Dabie Orogenic Belt

3.2 北秦岭

据游振东等(1991)的研究,北秦岭地表出露的大面积秦岭群的中-高级变质岩是晋宁期和加里东期北秦岭抬升 26km 后被剥蚀出来的,它们仅构成北秦岭现今上地壳,并未延伸至中一下地壳。因为北秦岭地壳上部的一系列地球物理性质如地震波速、电性、磁性等不同于一中一下地壳(周国藩等 1992)。

在15km深度条件下,北秦岭秦岭群、宽坪群和花岗岩的实验 V_p (表2)加权平均分别为6.27、6.16和5.83km/s,按所估计的三者在上地壳中所占的体积比(Gao et al. 1992)可求出北秦岭上地壳平均实验 V_p 为6.08km/s,与实测的北秦岭5~16km深度的平均地震 V_p 6.10km/s吻合。

按照伊川-十堰QB-1剖面的地质解释(袁学诚等1991;张国伟等1991),北秦岭的中一下地壳由俯冲的南秦岭基底岩系组成。武当群、碧口群、郧西群、耀岭河群和鱼洞子群是南秦岭的主要变质岩群,它们均遭受了绿片岩相和低角闪岩相中高压至高压变质作用,原岩主要为基性和酸性火山岩(刘国惠等1993;刘国惠,张寿广1990)。若这些基底岩系俯冲至北秦岭中地壳深度,在该深度上它们岩石的实验 V_p (表3)平均值为6.04km/s,而北秦岭实测中地壳地震 V_p 值为5.70~5.94km/s,两者的差异如何解释呢?在大陆内部高热流的构造或地震活动带,发现了一些壳内低速高导层,据认为这是由部分熔融、相变、流体相存在或构造弱化带引起的(孙武城等1987;王学颖等1991;崔作舟等1993)。如科拉半岛深部钻探在7~11km深度上可见到弱化裂隙带,并充填有流体,由此导致了岩石的各向异性(崔霖沛1991),以此可解释低速高导层起因。QB-1剖面从栾川到郧县中地壳的低速高导层也可能是构造成因。在秦岭造山带陆-陆俯冲碰撞造山的过程中,中地壳深度的剪切、滑脱作用等使岩石固有的弱化裂隙加强,裂隙中不同程度地充填了流体,并导致波速的各向异性,这与高热流的造山带地区中地壳的特殊性质和状态是相符的^{①②},当然亦不排除中地壳部分熔融存在的可能性。Kern et al. (1993)认为垂直于变形组构方向比沿变形组构方向的 V_p 会降低5%~7%,最大达12%。我们实验测定的岩石 V_p 值均是平行于变形组构(片麻理)方向的,若其垂直方向降低5%~7%(0.3~0.4km/s),则可完全解释上述北秦岭中地壳岩石平均实验 V_p 值与地震 V_p 值的差异。桐柏大河杂岩麻粒岩的原岩为玄武岩和沉积岩(孙勇等1993),假设南秦岭基底岩系的变基性和酸性火山岩俯冲至下地壳深度后变成麻粒岩,其成分与大河杂岩的基性、酸性麻粒岩成分近似,则它们的 V_p 值(表5)分别相当于7.13和6.35km/s(平均6.74),这与北秦岭下地壳地震 V_p 值6.7~6.8km/s相符。

3.3 南秦岭和扬子地台北缘

南秦岭和扬子地台北缘的中地壳分别由它们的元古宙角闪岩相基底岩系组成。如上面讨论,南秦岭基底岩系为5.6~6.0km/s,与中地壳的地震 V_p 值(5.72~6.05km/s)相吻合。两区花岗岩在上、中地壳深度内平均实验 V_p 值为5.50~6.02km/s,因此可以推断花岗岩是中、上地壳的组成部分。高角闪岩相-麻粒岩相的晚太古代崆岭群可能是南秦岭和扬子地台北缘下地壳的主要组成,因为虽然崆岭群四周为未变质的元古-中生代巨厚沉积,出露有限,但是崆岭群片麻岩形成于下地壳条件(徐勇在日本京都大学测定,具体结果不详,1994私人通信),其相当于下地壳深度条件下的平均实验 V_p 值为6.71~6.90km/s,与本区下地壳的地震

① 张国伟,孟庆任. 1994. 秦岭造山带的结构构造;刘建华等. 1994. 秦岭造山带及其南北缘地震层析成像;肖庆辉等. 1994. 当代造山带研究中值得重视的若干前沿问题. 均见秦岭-大别山造山带学术研讨会会议材料.

② 李晓波等译. 1993. 美国大陆动力学研究的国家计划.

V_p 值(6.61~7.00km/s)^①相近。

4 研究区地壳成分及其对秦岭造山带地壳形成和发展的指示

根据以上四个构造单元的地壳岩石组成模型,估算了区域各构造单元不同地壳层次43个元素的丰度(见 Gao et al. 1992)。总的来说,秦岭地区中—下地壳总体成分是闪长-花岗闪长质的,这与其低的平均地震波速(6.06km/s)及较高的地表热流(72~109mWm⁻²,高山等 1990)一致。其成分估计值与太古宙和后太古宙麻粒岩地体相似,比世界平均麻粒岩包体偏中酸性。估算方法及讨论详见 Gao et al. (1992)。以下仅探讨地壳成分对秦岭造山带形成和发展的指示。

4.1 造山带内部物质分异

对比四个构造单元的地壳成分,可以看出,华北地台南缘表现出由下地壳向上地壳相容元素 ΣFeO 、 MnO 、 Sc 、 V 、 Co 、 Ni 、 Cu 和 Na_2O 含量逐渐降低,而不相容元素 K_2O 、 Li 、 Be 、 Ba 、 Pb 和 REE 含量逐渐升高。但是,南秦岭和扬子地台北缘则表现出中地壳比下地壳更富 TiO_2 、 ΣFeO 、 Na_2O 、 Sc 、 V 、 Co 、HREE、更贫 SiO_2 、 K_2O 、 Be 、 Th 、LREE。上述对比中排除了受碳酸盐岩影响较大的组分对比,因为碳酸盐岩主要在地壳表层富集。

一般认为,地壳深熔作用和花岗岩浆或流体向地壳浅部的运移是造成地壳内部物质分异的主要过程(Taylor and McLennan 1985; Touret 1987; Wickham 1988; Wedepohl 1991)。在这种过程中形成的产物富集不相容元素。因此,以上揭示的元素垂向分布型式表明,华北地台地壳分异与这些过程有关,属于正常分异型式,浅部地壳是在深部地壳的基础上发展起来的。而南秦岭与扬子地台北缘属异常地壳分异型式,其中地壳不是在下地壳的基础上形成的,两者无成因联系。现有的地质和同位素资料进一步支持了上述结论。如 Kroner et al (1988)的单颗粒锆石年龄测定表明,2.5Ga的登封群变英安流纹岩中含有来自太华群的老锆石(2.9Ga)。我们以往的研究表明,2.8Ga的崆岭群以 TTG 片麻岩和变沉积岩为主,其中变沉积岩 REE 组成特征与后太古宙沉积岩相似,而元古宙的扬子地台北缘与南秦岭基底岩系含有大量中—晚元古代岛弧基性火山岩,这些基性火山岩代表了地幔向地壳新的增生物质(高山等 1990)。

花岗岩浆作用是造成地壳内部物质分异的主要机制,花岗岩的成分可以指示地壳分异程度(Taylor and McLennan 1985; Touret 1987; Wickham 1988; Wedepohl 1991)。秦岭花岗岩最显著特征是分异程度低,如华北地台、北秦岭和南秦岭花岗岩的平均成分都表现为低 SiO_2 (69.41~70.29%) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(0.90~1.05),而初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 也低(大多为 0.704~0.714),Eu 异常相对不明显(Eu/Eu* 为 0.53~0.64)(Gao et al. 1992)。而世界典型造山带花岗岩,如喜马拉雅造山带、阿尔卑斯造山带、西欧海西造山带、华南花岗岩、世界平均花岗岩和平均 S 型花岗岩一般为 $\text{SiO}_2 > 70.3\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1.1$ 、 $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.38$,初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr > 0.71 (Le Maitre 1976; Whalen et al. 1987)。分异程度低,它决定了秦岭造山带总体化学组

① 国家地震局地壳应力研究所、国家地震局武汉地震研究所。1990。长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究。

成和化学过程的特征。

4.2 造山带的板底垫托与拆离作用

板底垫托(*underplating*)与拆离作用(*delamination*)是导致造山带下地壳形成与演化的两种重要机制(Drummond and Collins 1986; Drummond 1988; Bergantz 1989; Klemperer 1989; Turcotte 1989; Rudnick 1990; Kay and Kay 1991; Percy et al. 1990)。来自地幔的基性岩浆垫托在下地壳底部使地壳得以增生,同时岩浆带来的热又使地壳发生部分熔融。而拆离作用则使下地壳底部由于部分熔融或板底垫托产生的基性物质返回上地幔,从而实现壳幔物质交换,并导致造山带根部消失。

地球物理学鉴定板底垫托作用的标志之一是地震 V_p 在壳-幔边界的变化情况。如果下地壳与上地幔之间 V_p 呈渐变关系,无明显不连续性,下地壳成分是基性的,与上地幔差异不大,意味着下地壳受到的板底垫托作用较强烈。若壳-幔边界存在阶梯状明显 V_p 正梯度,则表明下地壳的成分是长英质的,与上地幔成分差异悬殊。世界范围内的统计资料表明,现今太古宙地区壳-幔边界一般存在明显阶梯状正 V_p 梯度,说明板底垫托作用在太古宙时不明显或者原先存在的太古宙板底垫托物质已返回上地幔;现今后太古宙、元古宙岩石出露地区壳-幔边界的 V_p 一般呈过渡状态;随地壳省的年龄降低,壳-幔边界 V_p 梯度逐渐增大,基性岩浆在下地壳的板底垫托作用逐渐减弱(Durrheim and Mooney 1991; Drummond and Collins 1986)。

另一方面,由于拆离作用,老造山带如西欧海西造山带、阿巴拉契亚造山带、科迪勒拉造山带均不存在山根,莫霍面显示出较小的错动,其断距 $< 3\text{km}$;而年轻造山带如喜马拉雅造山带、阿尔卑斯造山带、比利牛斯造山带在地壳下存在着补偿隆起地形的山根,造山带下边界的莫霍面呈叠瓦状构造,其断距 $> 10\text{km}$ 。全球地震测深资料还表明,莫霍面的形成可能晚于造山带的形成,因受板底垫托和拆离作用的影响,其位置随时间而改变(Nelson 1992; 吴其斌 1991)。

QB-1 剖面 and 秦岭地震层析成像结果^①表明:本区从华北地台南缘至南秦岭,壳-幔边界 V_p 均呈清楚的阶梯状,下地壳地震 V_p 为 $6.49\sim 6.81\text{km/s}$,上地幔为 $7.75\sim 7.82\text{km/s}$,梯度 $> 1.0\text{km/s}$,而断距 $< 3\text{km}$,秦岭造山带不存在山根,这说明板底垫托物质在现今秦岭下地壳中即使存在数量也较少,与秦岭下地壳总体长英质成分一致。另一方面,我们获得的秦岭地壳总体成分具显著 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.75$),即使假设本区下地壳成分是基性的,并取成分与世界平均基性麻粒岩包体($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.17$)相同,所产生的本区地壳总体成分亦具明显 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.82$) (详见 Gao et al., 1992)。由于地壳最初是由来自地幔的物质组成,上地壳 Eu 负异常被下地壳 Eu 正异常抵消,因此一般认为地壳总体应不具 Eu 异常,而秦岭造山带则例外,其下地壳与地壳总体均具明显 Eu 负异常。

如上讨论,现今秦岭造山带莫霍面附近有较大的壳-幔速度梯度,不存在山根,下地壳具有长英质的成分,地壳总体的 REE 分配式样具 Eu 负异常,这些特点表明,秦岭造山带发展演化中拆离作用起着重要作用,这种作用使原先可能存在于秦岭地壳底部的基性板底垫托物

^① 高山等, 1997, 秦岭造山带及其南北缘地震层析成像, 秦岭-大别山造山带学术研讨会会议材料。

质或部分熔融残留的基性物质(一般具Eu正异常)作为造山带山根已返回上地幔。

致谢 中国科学院地球化学研究所谢鸿森研究员、张月明、徐惠刚和郭捷老师为高温高压波速实验提供了巨大的支持和帮助;刘庆生副教授提供了岩石高压实验波速数据;欧阳建平、张宏飞、许继峰和周文戈同志为实验提供了部分样品,一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 曹家敏,朱介寿,吴德超. 1994. 东秦岭地区的地壳速度结构, 成都理工学院学报, 21 (1), 11~17
- 崔霖沛. 1991. 深部地质调查之现状. 见: 项仁杰、史崇周、冯昭贤主编, 地壳和上地幔研究 (八十年代进展). 北京: 地震出版社, 130~149
- 崔作舟, 尹周勋, 高恩元, 卢德源, 付维洲. 1993. 青藏高原速度结构和深部构造. 北京: 地质出版社, 60~72
- 高山等. 1990. 秦岭造山带及其邻区大陆地壳的结构与成分研究. 见: 张本仁等著, 秦巴区域地球化学文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 33~49
- 高山, 张本仁等. 1991. 华北板块与扬子板块志留-泥盆纪对接的沉积地球化学证据. 中国科学 (B辑), 6: 645~651
- 高山, 张本仁. 1993. 秦岭造山带及其邻区岩石的放射性与岩石圈的现代热结构和热状态. 地球化学, 3: 241~245
- 刘国惠, 张寿广 (主编). 1990. 秦岭大巴山地质论文集 (一), 变质地质. 北京: 科学技术出版社
- 刘国惠等. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化. 北京: 地质出版社
- 刘庆生, 高山, 侯渭, 张月明, 徐惠刚, 郭捷. 1994. 河南登封-鲁山地区地壳出露剖面岩石高压条件下地震波速特征的研究. 地球科学-中国地质大学学报, 19 (1): 109~112
- 刘庆生, 高山, 徐启东. 1993a. 登封-鲁山一带出露的大陆地壳剖面的磁性结构研究. 中国科学 (B辑), 23 (10): 1091~1098
- 刘庆生, 高山. 1993b. 一个新太古宙断面的地球物理性质. 地球科学-中国地质大学学报, 18 (4): 510~512
- 孙武城, 李松林, 罗力雷, 岳华峰. 1987. 初论华北地区的地壳低速层. 地震地质, 9 (1), 17~26
- 王学颖等. 1991. 国际岩石圈计划 (ICP) 述评. 见: 项仁杰、史崇周、冯昭贤主编, 地壳和上地幔研究 (八十年代进展). 北京: 地震出版社, 14~24
- 吴其斌, 张肇元. 1991. 全球地学大断面计划. 见: 项仁杰、史崇周、冯昭贤主编, 地壳和上地幔研究 (八十年代进展). 北京: 地震出版社, 25~39
- 吴宗絮. 1992. 冀东早前寒武角闪岩相、绿片岩相岩石及中、上地壳分层的讨论. 地震地质, 14 (4): 358~366
- 吴宗絮, 郭才华. 1991. 冀东陆壳结构的岩石学模型. 地震地质, 14 (4): 369~375
- 吴宗絮, 邓晋福, 赵海玲, 杨主恩, 罗淑兰. 1994. 华北大陆地壳-上地幔岩石学结构与演化. 岩石矿物学杂志, 13 (2): 106~115
- 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 侯渭, 郭捷. 1993. 高温高压下测量岩石矿物波速的新方法及其意义. 中国科学 (B辑), 23 (8): 861~864
- 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟 (主编). 1991. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社
- 游振东, 董书田, 韩郁菁, 钟增球, 陈能松. 1991. 秦岭造山带核部变质杂岩的基本特征与东秦岭大陆地壳的构成. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟 (主编), 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 1~14
- 袁学诚. 1991. 秦岭造山带的深部构造与构造演化. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟 (主编), 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 174~84
- 张本仁等. 1987. 豫西卢氏-灵宝地区区域地球化学研究, 地质专报 (三), 5. 北京: 地质出版社
- 张本仁等. 1989. 陕西柞水-山阳成矿带区域地球化学. 武汉: 中国地质大学出版社
- 张本仁等. 1990. 秦巴区域地球化学文集. 武汉: 中国地质大学出版社

- 张本仁等. 1994. 秦巴岩石圈、构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社
- 张国伟(主编). 1988. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社
- 张国伟, 周鼎武, 于在平, 郭安林, 程顺有, 李桃红, 张成立, 薛锋. 1991. 秦岭造山带岩石圈组成、结构与演化特征, 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟(主编), 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社. 121~138
- 张友南, 李彪. 1993. 冀北地壳深部岩石波速 V_p 初步研究. 地震地质, 105(2): 138
- 周国藩, 罗孝宽, 管志宁等. 1992. 秦巴地区地球物理场特征与地壳构造格架关系的研究. 武汉: 中国地质大学出版社
- Bergantz G W. 1989. Underplating and partial melting: Implications for melt generation and extraction. *Science*, 245: 1093~1095
- Birth F. 1961. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. Part 2. *J. Geophys. Res.*, 66(7): 2199~2224
- Burke M M and Fountain D M. 1990. Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust—new laboratory measurements from the Ivrea Zone. *Tectonophysics*, 182: 119~146
- Christensen N I and Fountain D M. 1975. Constitution of the lower continental crust; based on experimental studies of seismic velocities in granulite. *Geol. Society Amer. Bull.* 86: 227~236
- Drummond B J. 1982. Seismic constraints on the chemical composition of the crust of the Pilbara Craton, Northwest Australia. *Revista Brasileira de Geociencias*, 12(1-3): 113~120.
- Drummond B J and Collins C D N. 1986. Seismic evidence for underplating of the lower continental crust of Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 361~372
- Drummond B J. 1988. A review of crust/upper mantle structure in the precambrian areas of Australia and implications for precambrian crustal evolution. *Precambrian Res.*, 40/41: 101~116
- Durrheim R J and Mooney W D. 1991. Archean and Proterozoic crustal evolution; Evidence from crustal seismology. *Geology*, 19: 606~609
- Fountain D M. 1976. The Ivrea-Verbano and Strona-Ceneri zones, northern Italy: A cross-section of the continental crust—New evidence from seismic velocities. *Tectonophysics*, 33: 145~165
- Fountain D M and Christensen N I. 1989. Composition of the continental crust and upper mantle; A review, in Pakier, L. C., and Mooney, W. D., *Geophysical framework of the continental United States*; Boulder, Colorado, Geological Society of America Memoir 172: 711~742
- Fountain D M, Salisbury Matthew H and Percival J. 1990. Seismic structure of the continental crust based on rock velocity measurements from the Kapuskasing uplift. *J. Geophys. Res.*, 95B: 1167~1186
- Gao S, Zhang B R and Li Z J. 1990. Geochemical evidence for Proterozoic continental arc and continental-margin rift magmatism along the northern margin of the Yangtze Craton, South China. *Precambrian Res.*, 47: 205~221
- Gao S, Zhang B R, Xie Q L, Gu X M, Ouyang J P, Wang D P and Gao C L. 1991. Average chemical composition of post-Archean sedimentary and volcanic rocks from the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze Cratons. *Chem. Geol.*, 92: 261~282
- Gao S, Zhang B R, Luo T C, Li Z J, Xie Q L, Gu X M, Zhang H F, Ouyang J P, Wang D P and Gao C L. 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze cratons, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 56: 3933~3950
- Kay R W and Kay S M. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geol. Rundsch*, 80: 259~278
- Kern H and Schenk V. 1985. Elastic wave velocity structure in rocks from a lower crustal section in southern Calabria (Italy). *Phys. Earth Planet. Int.*, 40: 147~160
- Kern H and Schenk V. 1988. A model of velocity structure beneath Calabria, southern Italy, based on laboratory data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 87: 325~337
- Kern H M. 1993a. Physical properties of crustal and upper mantle rocks with regards to lithosphere dynamics and high pressure mineralogy. *Phys. Earth Planet. Int.*, 79: 113~136
- Kern H, Walther Ch, Fluh E R and Marker M. 1993b. Seismic properties of rocks exposed in the POLAR profile re-

- gion—constraints on the interpretation of the refraction data. *Precambrian Res.*, 64: 169~187
- Klemperer S L. 1989. Deep seismic reflection profiling and the growth of the continental crust. *Tectonophysics*, 161: 233~244
- Kroner A, Compston W, Zhang G W, Guo A L, and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16: 211~215
- Le Maitre R W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *J. Petrol.*, 17: 589~598
- Liu Q S, and Gao S. 1992. Geophysical properties of the lower crustal granulites from the Qinling Orogenic Belt, China. *Tectonophysics*, 204: 401~408
- Nelson K D. 1992. Are crustal thickness variations in old mountain belts like the Appalachians a consequence of lithospheric delamination? *Geol.*, 20: 498~502
- Pearcy L G, Debari S M and Sleep N H. 1990. Mass balance calculation for the formation of continents. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96: 427~442
- Rudnick R L. 1990. Growing from below. *Nature*, 347: 711~712
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell
- Touret J. 1987. Fluid distribution in the continental lithosphere. In *Proterozoic Lithospheric Evolution* (ed. A. Kroner); *Geodyn. Ser.*, 17: 27~33
- Turcotte D L. 1989. Geophysical processes influencing the lower continental crust. In *Properties and Processes of the Earth's Lower Crust* (ed. R. F. Mereu et al.); *Amer. Geophys. Union Monogr.*, 51: 321~329
- Wedepohl K H. 1991. Chemical composition and fractionation of the continental crust. *Geol. Rundsch*, 80: 207~223
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites; Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~419
- Wickham S M. 1988. Evolution of the lower crust. *Nature*, 333: 119~120