

胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向 ——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据^{*}

柳振江^{1,2} 王建平^{1**} 郑德文³ 刘家军¹ 刘俊¹ 付超¹

LIU ZhenJiang^{1,2}, WANG JianPing^{1**}, ZHENG DeWen³, LIU JiaJun¹, LIU Jun¹ and FU Chao¹

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. 南京大学地球科学系内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093

3. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

1. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2010-01-01 收稿, 2010-09-03 改回.

Liu ZJ, Wang JP, Zheng DW, Liu JJ, Liu J and Fu C. 2010. Exploration prospect and post-ore denudation in the northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from apatite fission track thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3597–3611

Abstract Many ore deposits underwent different spatial changes after formation. Post-ore change and preservation is very important to ore deposit exploration. Regional uplift and denudation are critical factors controlling post-ore change and preservation of ore deposits. Tectono-thermochronology is an effective way to study regional uplift and denudation, quantitatively providing denudation rate and degree. This paper focused on gold deposits and host rock (Linglong granite) in the northwestern Jiaodong Gold Province, China. Apatite Fission Track (AFT) thermochronology was used to evaluate uplift and denudation history of Linglong granite since 110Ma. The results show that denudation rates are very small, with an average of $0.0303 \pm 0.0044 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, suggesting that the post-ore tectono-thermal event is gentle and very beneficial to ore preservation. According to granite denudation rate, the erosion depth was calculated 2.0 ~ 4.2km, far less than the largest mineralization depths mainly concentrated on 4 ~ 10km. Considering that the current depth of exploration and mining is less than 2km, the space with deep gold exploration and prospecting is promising.

Key words NW Jiaodong Gold Province; Linglong granite; AFT; Tectono-thermochronology; Uplift and denudation; Prospecting potential

摘要 矿床形成后会经历不同形式的变化, 区域隆升与剥蚀是影响矿床变化保存最为关键的因素之一。构造-热年代学是目前广泛运用于研究区域隆升剥蚀的一种重要手段, 本文以我国最大金矿集中区——胶东西北部金矿及赋矿围岩玲珑花岗岩为研究对象, 尝试将构造-热年代学引用到矿床成矿后变化与保存研究。通过磷灰石裂变径迹热年代学测试获得玲珑花岗岩距今 110Ma 以来的隆升演化历史, 结果显示岩体剥蚀速率很小, 平均 $0.0303 \pm 0.0044 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 自金矿形成后区域热-构造运动趋于平静, 这对矿床的保存非常有利。胶东金矿成矿深度范围集中于 4 ~ 10km, 根据剥蚀速度计算玲珑花岗岩剥蚀量仅为 2.0 ~ 4.2km, 远未达到金矿最大成矿深度。当前本区金矿勘探和开采深度普遍小于 2km, 深部金矿找矿潜力良好。

关键词 胶东西北部金矿区; 玲珑花岗岩; 裂变径迹; 构造-热年代学; 隆升剥蚀; 找矿潜力

中图法分类号 P618.51

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403503)、国家自然科学基金项目(40602010)、教育部“111”计划(B07011)、南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金(14-08-13)和中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金项目(GPMR0737)联合资助。

第一作者简介: 柳振江, 男, 1983 年生, 博士研究生, 矿床学专业, E-mail: liu_zhjiang@163.com

** 通讯作者: 王建平, 男, 1972 年生, 副教授, 矿床学专业, E-mail: jpwang@cugb.edu.cn

1 引言

矿床是复杂地质作用的结果,矿床形成后会经历不同形式和不同程度的变化。矿床学研究应兼顾矿床形成(成因)和矿床变化、保存(产出)两方面以提高矿产预测的能力(翟裕生等,2000)。早在20世纪90年代,由于寻找隐伏矿床的迫切需要以及地球系统科学等理论的发展,一些学者(翟裕生,1993,1997;Jaques *et al.*, 1994)开始重视矿床形成和保存两方面的研究。进入21世纪,随着现代矿床学研究的不断深入,更多学者将目光转移到矿床保存研究方面,2005年第八届国际矿床会议上,大家认识到以前的研究过多地强调了矿床成因与形成环境。翟裕生在研究成矿系统理论时多次强调,矿床形成后的变化与保存对矿床的时空定位有着直接的影响,因而矿床形成后的变化与保存研究是全面认识矿床时空分布规律的前提,是矿床学研究的基本内容之一(翟裕生,2000,2007;翟裕生等,2000)。Groves *et al.* (2005)研究金矿床在地质历史分布的不均匀性时认为,矿床保存潜力的影响主要来自金成矿作用和矿床定位环境。其后,Kesler and Wilkinson(2006)和Wilkinson and Kesler(2007)强调了剥露作用(Exhumation)在矿床形成后保存过程中的影响,他们统计了浅成低温热液矿床、斑岩铜矿床和造山型金矿床之间剥露速率的差异,认为矿床在地质历史的分布规律很大程度上是由于剥露作用即埋藏、抬升和侵蚀共同作用的结果。王建平等(2008)曾专门探讨了裂变径迹法与流体包裹体研究结合起来研究矿床形成后变化与保存的方法。

矿床形成后经历的变化受到各种地质作用的控制和影响,包括内力、外力和不同圈层间的相互运动影响(翟裕生等,2000),区域隆升与剥蚀是最为关键的因素之一(Kesler and Wilkinson, 2006; 王建平等,2008)。自20世纪70~80年代封闭温度理论(Donson, 1973)提出以及与构造研究相结合之后,构造-热年代学成为研究区域隆升剥蚀作用最重要的一个方面(陈文奇等,1999;王瑜,2004;Reiners and Brandon, 2006;王瑜和周丽云,2008),裂变径迹是其中最常用也是有效的手段之一,这一方法能提供剥蚀速率以及剥蚀量的定量数据(Gallagher *et al.*, 1998)。我国研究者从20世纪90年代开始把裂变径迹等热年代学方法和理念应用于山体隆升与剥露的研究(陈江峰等,1995;Wang, 1998;郑德文等,2005)。花岗岩样品矿物来源相对均一,是利用裂变径迹技术提取热史的理想载体,因此有不少学者利用此理论开展对花岗岩体冷却剥露的研究(Hessa *et al.*, 1993; Hansen, 1995; Chen *et al.*, 1996; Yin *et al.*, 2001; Lim and Lee, 2005; 李理和钟大赉,2006;施小斌等,2006; Danišik *et al.*, 2008)。

裂变径迹在矿床学研究中主要用于成矿年龄测定(张峰等,1996;袁万明等,1999,2000,2002;李小明,2001)、成矿构造热历史演化(刘池洋等,2006;Maksaev *et al.*, 2009)与成矿期次分析(袁万明等,2001,2007)以及成矿物质(主要是铀)

赋存状态及分布型式的研究(丘志力等,1995;程华汉等,2000;张展适等,2005)。也有研究者(沈传波等,2005)曾提到裂变径迹法可用于矿床的抬升与剥蚀研究,但文中未见具体阐述。最近Maksaev *et al.* (2009)利用裂变径迹热年代学对智利Río Blanco-Los Bronces和El Teniente世界级超大型斑岩Cu-Mo矿床围岩中新世深成岩体冷却过程和剥露作用开展了深入研究,借此探讨了安第斯造山带新近纪以来的大地构造演化特征及Cu-Mo成矿过程。花岗岩与成矿经常有密切关系,笔者认为对作为金矿赋矿围岩的花岗岩体进行裂变径迹构造-热年代学测试,获得其热历史演化与冷却剥蚀情况,从而可以揭示矿床剥蚀程度并预测成矿潜力与找矿方向。

胶东西北部地区是中国最重要的金矿集中区之一,赋矿岩石主要是中生代花岗岩类(广义玲珑花岗岩)。据此,本文以玲珑花岗岩体以及金矿为研究对象,按剖面系统采集样品进行磷灰石裂变径迹构造-热年代学研究,获得花岗岩体隆升演化与冷却历史,定量探讨矿区不同部位的剥蚀情况。综合前人有关区内金矿成矿深度研究成果,对比分析区内金矿自形成后至今的变化保存过程,进而对区内金矿的深部潜力做出预测,为找矿勘探工作提供关键性指示作用。

2 地质概况

胶东地区是我国最重要的金矿区,截至2004年底已查明资源储量1260t,约占全国探明储量的24%(李士先等,2007),其中胶东西北部金矿储量占整个胶东金矿储量的近90%。胶东西北部金矿区位于华北克拉通东缘,属胶北地体隆起区,东邻太平洋板块,西侧与郯庐断裂带相接,南面为大别-苏鲁超高压变质带(图1a)。区域断裂构造非常发育,直接控制金矿的构造带基本上都以NE-NNE向为主,如三山岛断裂、焦家-新城断裂、招远-平度断裂等。区内地层主要出露有由太古宙胶东群和古元古代荆山群、粉子山群组成的变质岩系结晶基底以及中-新生代陆相碎屑、火山沉积地层。

胶东地区岩浆侵入活动剧烈而频繁,尤其以中酸性、酸性岩类规模大、分布广。中生代大规模岩浆活动以侵入作用为主,并具有多期多阶段的特点,早期以花岗质岩浆为主,晚期常伴随中基性脉岩群贯入。以花岗岩为围岩和主要以花岗岩为围岩的金矿约占金总储量的93%(周军等,2001),主要是玲珑片麻状黑云母花岗岩、滦家河二长花岗岩,另外还有郭家岭花岗闪长岩及艾山似斑状二长花岗岩呈岩基或岩株状侵入于玲珑花岗岩体(图1b)。SHRIMP U-Pb测年确定玲珑和滦家河花岗岩成岩年龄为160~150Ma,郭家岭花岗闪长岩年龄为130~126Ma(Wang *et al.*, 1998; 罗镇宽和苗来成,2002; Qiu *et al.*, 2002)。

本区主要特大型、大型金矿如玲珑、焦家、三山岛为石英脉型-破碎蚀变岩型,还有少量以大庄子、蓬家沓为代表的胶莱盆地北缘滑脱破碎带内的角砾岩型金矿。石英脉型-破碎

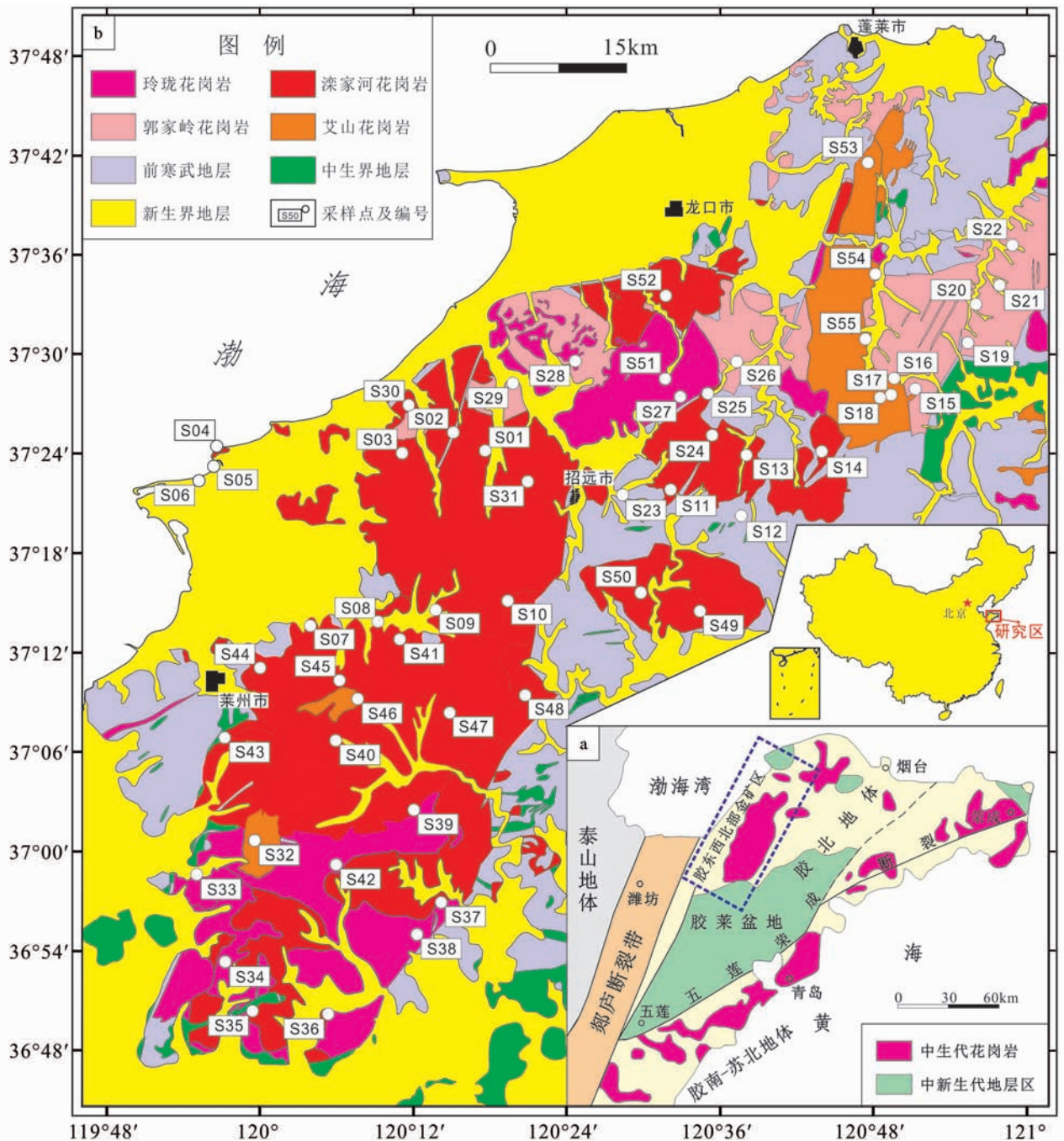


图1 区域地质及采样位置图

(a)-山东半岛区域地质图(据曹国权等,1990 修编);(b)-研究区花岗岩体分布及采样位置图;图(b)中采样点编号对应表1中的采样点编号

Fig.1 Schematic map showing sample location and regional geology of the northwestern Jiaodong Gold Province

(a)-the regional geology of Jiaodong Peninsular (modified after Cao *et al.*, 1990); (b)-the spatial distribution of granites and samples whose numbers accord with those in Table 1

蚀变岩型金矿床受构造控制明显,主要分布于NE向的三山岛断裂带-焦家-新城断裂带及招远-平度断裂带,这三个低角度断裂带中几乎集中胶东地区金矿储量的80%(王鹤年和汪耀,1991;吕古贤等,1999)。大量研究工作表明金矿床形

成时间主要集中于120Ma左右(Chen *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2008; 侯明兰等,2006;蒋少涌等,2009)。Sun *et al.* (2007)认为胶东矿区缘于太平洋板块俯冲方向改变所引起的应力场变化。蒋少涌等(2009)研究表明胶东金矿形成于早白

表1 采样位置及样品描述

Table 1 Geology and location of samples

采样点编号	采样位置	纬度/N	经度/E	海拔(m)	样品岩性描述	样品编号
玲珑岩体						
S25	吕家	37°27'18"	120°33'35"	203	玲珑花岗岩	LJ01
S27	九曲	37°26'52"	120°31'53"	230	玲珑花岗岩	JQ01
S34	棘子嶂村南	36°52'52"	119°56'38"	246	崔召花岗岩	LFSH01
S35	刘村凤凰山	36°50'08"	119°59'41"	134	崔召花岗岩	FHS01
S36	崔召东	36°49'54"	120°04'59"	96	崔召花岗岩	CZD01
S37	螫莱山	36°56'16"	120°13'55"	145	崔召花岗岩	AL01
S38	大洪阜	36°54'30"	120°11'40"	137	崔召花岗岩	DHF01
S39	旧店	37°02'00"	120°11'25"	192	云山花岗岩	JD01
S40	老草沟	37°06'24"	120°05'32"	179	郭家店花岗岩	GJD01
S41	庙山(东山)	37°12'41"	120°10'21"	163	郭家店花岗岩	MS01
S42	杏庙(大田乡)	36°58'50"	120°05'37"	97	花岗岩	XM01
S44	五里庄(莱州)	37°10'42"	120°00'04"	141	郭家店花岗岩	WLZ01
S47	柴棚	37°07'48"	120°13'57"	169	郭家店花岗岩	CP01
S48	夏甸	37°08'45"	120°19'51"	124	郭家店花岗岩	XD01
S49	毕郭	37°13'46"	120°33'28"	143	郭家店花岗岩	BG01
S50	西罗	37°15'27"	120°28'58"	132	郭家店花岗岩	XLU01
S51	大蒋家	37°27'47"	120°30'18"	293	玲珑花岗岩	DJJ01
S52	下丁家	37°32'52"	120°30'46"	143	玲珑花岗岩	XDJ01
滦家河岩体						
S01	蚕庄东	37°23'46"	120°16'36"	130	斑状花岗闪长岩	CZ01
S02	蚕庄东	37°24'13"	120°14'07"	108	中粗粒花岗闪长岩	CZ02
S03	蚕庄	37°23'45"	120°10'46"	108	花岗闪长岩	CZ03
S08	驿道	37°13'50"	120°8'51"	67	花岗闪长岩	YD01
S09	三元	37°14'28"	120°14'13"	101	花岗闪长岩	SY01
S10	三元	37°14'50"	120°18'52"	156	花岗闪长岩、细晶岩	SY02
S12	交界口	37°19'38"	120°36'3"	201	滦家河钾长花岗岩	JJ01
S13	交界口	37°23'35"	120°36'38"	134	滦家河钾长花岗岩	JJ02
S14	苏家店	37°23'48"	120°42'20"	183	滦家河钾长花岗岩	SJD01
S23	大秦家	37°21'23"	120°27'08"	83	滦家河花岗岩	DQJ01
S24	滦家河	37°24'21"	120°33'51"	154	滦家河花岗岩	LJH01
S31	金岭	37°21'57"	120°20'05"	159	蚕庄花岗岩	JL01
郭家岭岩体						
S04	三山岛金矿	37°24'38"	119°56'51"	5	花岗闪长岩	SSD01
S05	新立金矿	37°23'13"	119°56'19"	0	似斑状花岗岩	XL01
S06	新立金矿	37°22'13"	119°55'32"	1	似斑状花岗闪长岩	XL02
S07	莱州市东	37°13'27"	120°3'35"	65	花岗闪长岩	CG01
S15	王庄	37°27'26"	120°49'8"	138	细粒花岗岩	WZ01
S16	王庄	37°27'54"	120°47'36"	163	郭家岭花岗岩	WZ02
S19	郭家店	37°30'34"	120°52'59"	139	郭家岭花岗岩	GJL01
S20	沙沟	37°32'48"	120°52'38"	124	郭家岭花岗岩	GJL02
S21	遇驾乔	37°33'51"	120°55'42"	100	郭家岭花岗岩	YJK01
S22	遇驾乔北	37°36'20"	120°57'09"	47	郭家岭花岗岩	YJK02
S26	田家	37°29'18"	120°36'02"	82	郭家岭花岗岩	TJ01
S28	丛家	37°29'20"	120°23'27"	91	郭家岭花岗岩	CJ01
S29	张星	37°27'31"	120°19'44"	36	郭家岭花岗岩	ZX01
S30	上庄	37°26'30"	120°11'16"	81	郭家岭花岗岩	SZ01
S46	南宿	37°09'02"	120°06'55"	139	郭家岭花岗岩	NS02
S56	大柳行金矿	37°35'03"	121°01'45"	148	似斑状花岗闪长岩	DLH01
艾山岩体						
S17	巩家庄	37°27'01"	120°46'49"	220	花岗闪长岩	WZ03
S18	巩家庄	37°27'04"	120°46'38"	300	细粒二长花岗岩	GJZ01
S32	青台山	37°00'22"	119°59'31"	179	青台山二长花岗岩	QTS01
S33	大泽山	36°58'17"	119°54'24"	104	青台山二长花岗岩	DZS01
S45	南宿	37°09'23"	120°06'17"	122	艾山超单元二长花岗岩	NS01
S53	会文	37°41'07"	120°45'39"	162	抓鸡山密斑二长花岗岩	XJG01
S54	张家沟	37°34'34"	120°46'07"	113	花岗闪长岩	ZJG01
S55	柳格庄	37°30'29"	120°45'48"	133	巩家山花岗闪长岩	LGZ01
伟晶岩脉						
S11	梧桐乔	37°20'57"	120°30'52"	173	伟晶岩(滦家河岩体内)	WTK01
S43	笔架山	37°06'43"	119°56'45"	136	伟晶岩(玲珑岩体内)	BSJ01

注:采样点编号对应于图1b中的采样点及编号

巫世(130~120Ma)与洋壳俯冲(增生)造山相关的活动大陆边缘环境,提出在俯冲太平洋板块后退背景下,胶东地区增厚地壳中的榴辉岩相下地壳及下伏岩石圈地幔发生两阶段拆沉,强烈的壳幔相互作用最终导致早白垩世普遍的岩浆活动以及金爆发式成矿的模式。

3 样品采集与实验方法

本次测试采用区域剖面方式采集样品,采样范围为胶东半岛西北部金矿区 N36°44'39"~N37°50'30"和 E119°46'06"~E120°59'08"范围内的玲珑花岗岩体内。所有样品均采自采石场新鲜露头,采样位置及高程使用 Magellan's GPS 315 型 GPS 接收机标定。一共采集样品 56 件,采样位置(图 1)及样品描述见表 1。磷灰石裂变径迹构造-热年代学测试在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行,采用外探测器法(Gleadow and Duddy, 1981),测试工作由第一作者全程操作完成。

实验方法如下:①将采集的岩石样品粉碎至 60 目左右,经传统方法粗选后,利用电磁选、重液选等手段,进行磷灰石单矿物提纯。②将所选磷灰石颗粒在玻璃板上用环氧树脂滴固后研磨、抛光,使得矿物内表面露出,制成样片备用。③在 25℃ 下用 7% HNO₃ 蚀刻样片 30s 揭示自发径迹,将低铀白云母紧贴在样片上,与 CN5 铀标准玻璃一起构成定年组件送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照。④辐照后在 25℃ 下用 40% HF 蚀刻 20min 揭示诱发径迹。⑤利用 AUTOSCAN 测量定位装置选取磷灰石结晶 c 轴最大抛光面的颗粒,在 ZEISS 偏光显微镜下统计样品自发径迹数和诱发径迹数,进而计算裂变径迹年龄。

裂变径迹年龄根据 IUGS 推荐的 Zeta (ξ) 常数法和标准裂变径迹年龄方程(Hurford and Green, 1982)计算。Zeta (ξ) 标定选用国际标准样 Durango 磷灰石(31.4 ± 0.5Ma)和 Fish Canyon Tuff 磷灰石(27.8 ± 0.7Ma)共同标定,测试者用 CN5 铀玻璃标定并计算 Zeta (ξ) 常数为: Apatite-Zeta_{CNS} = 372.2 ± 14。

矿物的裂变径迹是在高精度光学显微镜高倍镜下测量,其正确识别至关重要。依据 Green(1981)的技术计算误差, χ^2 值用于评价所测单颗粒属于同一年龄组的概率(Galbraith, 1981; Galbraith and Laslett, 1993)。 $\chi^2 < 5\%$ 是单颗粒年龄不均匀分布的证据。如果发现年龄分散,则基于泊松变异的常规分析(Green, 1981)无效,而代之以“平均年龄”(Mean Age)。

4 实验结果

磷灰石裂变径迹年龄及径迹长度测试结果见表 2。CJ01 和 LGZ01 样品因外探测器低铀白云母发生解理面破裂无法获得结果,在获得裂变径迹年龄的 54 件样品中,WZ01 和 SSD01 的 Nc 数小于 10,且没有通过 $P(\chi^2)$ 检验而被剔除,其

余 52 件样品 $P(\chi^2)$ 均远大于 5%。

获得磷灰石裂变径迹测试结果的 52 件样品年龄分布在 119.3~64.2Ma 之间,平均 83.6 ± 11.9 Ma。玲珑花岗岩裂变径迹年龄 115.0~67.6Ma,平均 82.8 ± 11.7 Ma;漆家河花岗岩裂变径迹年龄 119.3~64.2Ma,平均 87.9 ± 17.5 Ma;郭家岭花岗岩闪长岩裂变径迹年龄 99.0~71.6Ma,平均 83.7 ± 8.6 Ma;艾山花岗岩 88.8~66.3Ma,平均 78.7 ± 7.5 Ma。从不同岩体年龄分布直方图(图 2)可以看出,裂变径迹的年龄

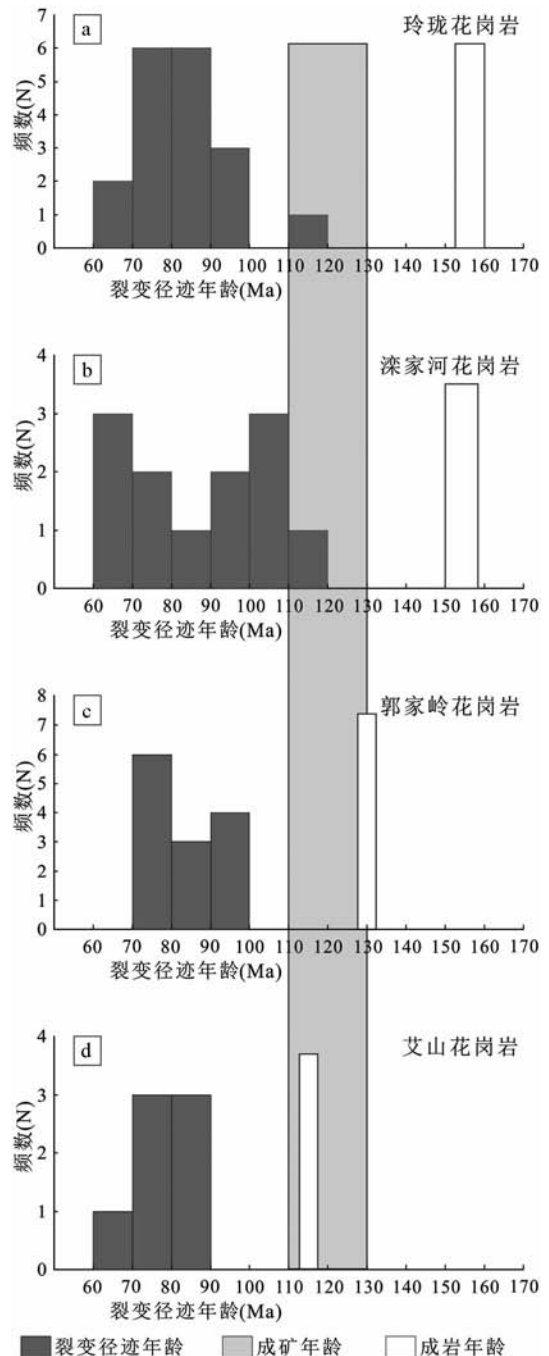


图 2 磷灰石裂变径迹年龄分布直方图

Fig. 2 Histogram of AFT ages

表2 磷灰石裂变变迹测试结果

Table 2 Observed results of AFT and relevant calculated data

样品号	N_c	$\rho_d(N_d) (\times 10^6 \text{cm}^{-2})$	$\rho_s(N_s) (\times 10^5 \text{cm}^{-2})$	$\rho_i(N_i) (\times 10^6 \text{cm}^{-2})$	$U (\times 10^{-6})$	$P(x^2) (\%)$	r	年龄 $\pm 1\sigma$ (Ma)
SY01	14	1.496(4489)	1.286(81)	0.5333(336)	4.5	12.2	0.792	66.8 \pm 8.7
JJ02	19	1.488(4465)	2.012(163)	0.8642(700)	7.3	19.8	0.666	64.2 \pm 6.2
WTK01	18	1.480(4441)	4.083(543)	1.399(1861)	11.8	19.1	0.913	79.9 \pm 5.1
WZ01	5	1.472(4417)	1.806(56)	0.7839(243)	6.7	0.1	0.454	71.8 \pm 23.6
CZ02	28	1.464(4392)	1.710(342)	0.6630(1326)	5.7	99.8	0.962	69.9 \pm 5.1
XLU01	26	1.456(4368)	2.068(453)	0.6790(1487)	5.8	89.8	0.949	82.0 \pm 5.5
XL02	26	1.448(4344)	2.415(285)	0.9042(1067)	7.8	69.6	0.971	71.6 \pm 5.6
SSD01	7	1.440(4320)	2.742(85)	0.6226(193)	5.4	1.1	0.331	135.0 \pm 25.1
BG01	26	1.432(4293)	1.662(266)	0.5775(924)	5.0	66.3	0.810	76.3 \pm 6.1
DLH01	26	1.424(4272)	3.215(791)	0.1088(2676)	9.5	10.2	0.817	77.9 \pm 4.5
XD01	29	1.416(4248)	0.9819(217)	0.2905(642)	2.6	77.9	0.726	88.5 \pm 7.8
ZJG01	28	1.408(4224)	2.141(411)	0.8411(1615)	7.5	58.9	0.718	66.3 \pm 4.5
BJS01	26	1.400(4199)	2.145(369)	0.6576(1131)	5.9	83.4	0.895	84.4 \pm 6.1
DJJ01	28	1.392(4175)	2.241(424)	0.7061(1336)	6.3	80.5	0.916	81.7 \pm 5.6
NS01	26	1.384(4151)	4.760(1209)	1.371(3482)	12.4	72.5	0.753	88.8 \pm 4.7
CP01	24	1.376(4127)	1.158(279)	0.4124(994)	3.7	15.1	0.694	71.5 \pm 5.6
JJ01	7	1.354(4061)	2.756(113)	0.6707(275)	6.2	21.2	0.758	102.7 \pm 12.2
WLZ01	15	1.340(4019)	1.577(205)	0.4300(559)	4.0	12.3	0.817	90.8 \pm 8.3
XL01	26	1.326(3976)	2.316(573)	0.6144(1520)	5.8	11.4	0.842	92.4 \pm 5.9
SY02	28	1.312(3934)	1.618(403)	0.4952(1233)	4.7	61.0	0.814	79.3 \pm 5.6
YD01	28	1.297(3892)	1.545(258)	0.3790(633)	3.7	97.2	0.718	97.6 \pm 8.2
CZ01	26	1.283(3850)	2.322(555)	0.6063(1449)	5.9	68.6	0.786	90.8 \pm 5.9
CG01	28	1.269(3807)	3.319(634)	0.8544(1632)	8.4	64.9	0.907	91.1 \pm 5.7
CZ03	26	1.255(3765)	2.092(525)	0.4781(1200)	4.8	40.8	0.781	101.4 \pm 6.7
LFSSH01	18	1.241(3723)	1.354(111)	0.2695(221)	2.7	97.2	0.647	115.0 \pm 14.2
GJD01	28	1.227(3681)	0.7703(171)	0.1905(423)	1.9	93.6	0.722	91.7 \pm 9.1
QTS01	28	1.213(3638)	2.741(655)	0.8255(1973)	8.5	72.6	0.909	74.5 \pm 4.5
DHF01	26	1.184(3554)	2.869(746)	0.6473(1683)	6.8	31.4	0.860	96.9 \pm 5.8
CZD01	28	1.170(3512)	2.389(614)	0.6732(1730)	7.2	97.4	0.970	76.8 \pm 4.8
SZ01	28	1.156(3469)	1.204(260)	0.2912(629)	3.1	100.0	0.892	88.3 \pm 7.5
XDJ01	26	1.569(5021)	2.533(608)	1.011(2427)	8.1	39.6	0.727	72.7 \pm 4.4
YJK01	28	1.548(4952)	5.938(1057)	1.832(3261)	14.8	84.0	0.889	92.7 \pm 5.0
GJL01	26	1.526(4882)	2.819(592)	0.8024(1685)	6.6	91.0	0.796	99.0 \pm 6.2
ZX01	26	1.504(4813)	2.583(656)	0.8047(2044)	6.7	44.6	0.876	89.2 \pm 5.4
DQJ01	26	1.483(4744)	2.152(424)	0.5665(1116)	4.8	65.1	0.881	104.0 \pm 7.3
WZ03	26	1.461(4675)	7.358(1810)	2.438(5998)	20.9	45.5	0.940	81.5 \pm 4.0
NS02	26	1.439(4605)	4.580(1003)	1.564(3426)	13.6	62.0	0.685	77.9 \pm 4.2
LJ01	26	1.417(4536)	1.294(330)	0.3859(984)	3.4	95.95	0.703	87.8 \pm 6.6
JQ01	26	1.396(4467)	1.705(404)	0.4954(1174)	4.4	91.2	0.764	88.8 \pm 6.3
TJ01	26	1.374(4398)	4.691(835)	1.660(2955)	15.1	97.0	0.938	71.9 \pm 4.0
WZ02	26	1.331(4259)	7.565(1740)	2.427(5583)	22.8	72.0	0.949	76.7 \pm 3.8
LJH01	26	1.309(4190)	2.143(435)	0.7034(1428)	6.7	99.4	0.943	73.8 \pm 5.0
SJD01	26	1.287(4121)	1.337(266)	0.2658(529)	2.6	99.9	0.911	119.3 \pm 10.2
YJK02	26	1.266(4051)	4.294(1082)	1.327(3344)	13.1	41.3	0.826	75.8 \pm 4.1
GJL02	28	1.235(3952)	4.259(1150)	1.151(3108)	11.6	68.9	0.874	84.5 \pm 4.5
GJZ01	26	1.225(3921)	4.505(901)	1.328(2655)	13.5	43.4	0.870	76.9 \pm 4.3
FHS01	23	1.216(3891)	1.895(360)	0.6111(1161)	6.3	94.8	0.947	69.8 \pm 5.1
DZS01	26	1.206(3860)	2.466(550)	0.7139(1592)	7.4	33.7	0.737	77.1 \pm 4.9
JL01	26	1.197(3830)	2.651(639)	0.6909(1665)	7.2	63.6	0.923	84.9 \pm 5.3
XJG01	26	1.187(3800)	2.646(680)	0.6751(1735)	7.1	74.1	0.883	86.0 \pm 5.2
XM01	26	1.178(3769)	3.242(778)	0.9692(2326)	10.3	55.5	0.917	72.9 \pm 4.2
MS01	26	1.168(3739)	2.202(469)	0.6211(1323)	6.6	99.2	0.830	76.6 \pm 5.2
JD01	26	1.159(3708)	2.000(462)	0.6346(1466)	6.8	83.0	0.661	67.6 \pm 4.6
AL01	26	1.149(3678)	1.960(488)	0.5052(1258)	5.5	63.1	0.618	82.4 \pm 5.5

注: N_c 为颗粒数; ρ_d 为标准诱发裂变变迹密度; N_d 为标准铀玻璃的诱发裂变变迹数; ρ_s 为自发裂变变迹密度; N_s 为自发裂变变迹总数; ρ_i 为诱发裂变变迹密度; N_i 为诱发裂变变迹数; $P(x^2)$ 为 x^2 统计, 是单颗粒年龄与所有颗粒的平均年龄符合的几率量度(%); r 是 N_s 与 N_i 的相关系数; U 指铀浓度; N_j 为测量的水平封闭径迹数; Apatite-Zeta $C_{N5} = 372.2 \pm 14$

(119.3 ~ 64.2Ma)明显要晚于岩体形成的年龄,同时也小于金的成矿年龄。广义玲珑花岗岩的成岩温度上限为 780 ~ 940℃,下限为 420 ~ 580℃(李士先等,2007),本区金矿成矿温度范围在 170 ~ 350℃之间(李兆龙和杨敏之,1993;徐九华等,1997;范宏瑞等,2005;张祖青等,2007),而磷灰石裂变径迹的封闭温度仅为 110℃,远远小于花岗岩形成的温度,也小于胶东金矿的成矿温度,反映本区磷灰石裂变径迹封闭温度是受成岩、成矿之后热事件影响的结果,因此其年龄记录的是岩体形成后尤其是金矿成矿后经历的构造-热活动。从图 2 来看,各岩体形成的裂变径迹年龄最大值及其跨度基本一致,其中玲珑花岗岩和滦家河花岗岩形成时间最早,构造热事件影响最多,裂变径迹年龄跨度大,其后形成的郭家岭岩体的年龄和更晚形成的艾山岩体裂变径迹年龄跨度小。因此磷灰石裂变径迹年龄所纪录的构造热活动信息都是金矿形成之后的,可以借此探讨金矿形成后变化保存的情况。

5 讨论——金矿成矿后变化保存过程

5.1 玲珑花岗岩体 110Ma 以来的隆升剥蚀作用

构造热年代学研究中根据不同矿物对某种同位素体系封闭特性的不同,建立不同矿物冷却温度与年龄的冷却曲线,可以研究某一地区的冷却历史,而冷却、剥蚀速率的定量计算直接与古地温梯度有关。同位素年代学文献中一般取 $25^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 或者 $30^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,但实际上不同构造区、不同深度的地温梯度并不同,因而所得到的结果具有不确定性或者不科学(张学民和王瑜,2004)。华北板块东部早期古老的巨厚富集岩石圈地幔在古生代以后被薄的亏损型软流圈或大洋型地幔所取代,且从中生代以后进入岩浆、构造变形、成矿、盆地形成等强烈发育的时期(吴福元等,2008)。印支运动以后华北板块进入解体阶段,强烈的构造运动和岩浆活动使热流值增高,形成了较高的地温场,在新生代的隆起区,白垩系的有机质所经历的最大古地温可代表白垩纪末的温度,因此,本文采用唐军(1998)根据白垩系有机质镜质体反射率资料求得的华北地区侏罗-白垩纪的地温梯度 $44^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,计算得出本区剥蚀速率,并用 Golden Software 的 Surfer 软件生成精细的剥蚀速率分布图(图 3)。结果显示,110Ma 以来,本区岩体抬升速率很低,仅 $0.0185 \sim 0.0389\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 $0.0303 \pm 0.0044\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中,玲珑花岗岩抬升速率为 $0.0217 \sim 0.0370\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 $0.0307 \pm 0.0040\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$;滦家河花岗岩为 $0.0295 \pm 0.0059\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 $0.0210 \sim 0.0389\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$;郭家岭花岗闪长岩为 $0.0185 \sim 0.0349\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 $0.0297 \pm 0.0045\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$;艾山花岗岩为 $0.0282 \sim 0.0377\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 $0.0320 \pm 0.0032\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,不同岩性之间无明显差异。据此计算,从 110Ma 以来,胶东西北部地区总的剥蚀量只有 2.0 ~ 4.3km,平均约 $3.3 \pm 0.5\text{km}$ 。张华锋等(2006)利用岩浆绿帘石压力计等方法并结合前人的研究

成果估算出不同时代岩体的侵位深度,认为近 110Ma 的时间里本区地壳隆升-剥蚀量不到 4km。这一结果与本次更为精细计算的结果是一致的。

从现今地形来看,胶东西北部地区为近海低山丘陵地形,主要山峰大泽山、艾山、罗山等海拔都在 500 ~ 800m 左右,本次采样点海拔 0 ~ 300m,平均 135m。岩体高程与剥蚀量(图 4)有一定的相关性,玲珑花岗岩、滦家河花岗岩和艾山花岗岩的剥蚀量都随着高程的增加而减小,说明自 110Ma 来没有经历较复杂的冷却或构造演化历史。而与胶东金矿形成时间最接近的郭家岭花岗闪长岩则明显地与前面三个岩体不同,经历过一些后期构造-热活动的干扰,其受到的热演化要更复杂一些。胶东矿集区中生代主要为大陆边缘活动阶段,经历了两个最显著的构造热事件,分别是印支期(约 250 ~ 208Ma)扬子与华北克拉通的碰撞造山作用和古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲并形成环太平洋岩浆岛弧(燕山期造山作用,208 ~ 90Ma)(陈衍景等,2004;Chen *et al.*, 2005)。燕山运动晚期早白垩世差异升降活动,使胶莱盆地和山间盆地迅速下沉形成了莱阳盆群陆相杂色碎屑岩沉积岩,不时伴有中酸性火山喷发,形成青山群陆相火山岩系。到了早白垩世中晚期,随着火山活动的减弱,岩浆侵入活动异常活跃,沿 NE、NNE 向构造运动先后有伟德山、雨山超单元及其之后的脉岩群的侵位。晚白垩世胶莱盆地再度沉降,接受了一套河流相、河湖相的红色碎屑岩沉积,并伴有基性玄武岩流的王氏群,在相对隆起地区,崂山超单元沿 NE、NNE 向构造侵入定位,燕山运动之后,大规模陆内造山活动基本结束,盆地消亡,地壳进入更稳定时期。新生代喜马拉雅期主要为差异升降活动,形成断块和盆岭构造,伴有基性玄武岩喷溢活动(李士先等,2007)。从磷灰石裂变径迹测试的结果计算来看,胶东西北部地区自 110Ma 以来,剥蚀速率只有 $0.0303 \pm 0.0044\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,构造热活动总体上趋向于平稳,说明裂变径迹热年代学的研究结果与区域构造演化的特征基本上吻合。有关玲珑花岗岩体的热构造演化过程还需要进一步研究,限于主题和篇幅在此不再赘述。

5.2 花岗岩与金成矿的关系

金矿与花岗岩的成因联系虽早就被强调并重视,但具体的关系需要深入研究和考虑,尤其在在我国华北板块(胡受奚等,1998),胶东中生代花岗岩与金矿的成因关系更是争论已久的问题(罗镇宽和苗来成,2002)。

从时间分布关系来看,Chen *et al.* (2005)研究认为本区金成矿作用以 130 ~ 110Ma 为高峰,成矿事件同步或略滞后于中生代花岗岩岩浆活动。同时胶东地区郭家岭花岗岩、基性岩脉与区内金矿成矿的同时性,以及金矿床中记录的幔源信息表明金与上述岩浆岩的来源关系密切(蒋少涌等,2009)。

空间分布上,本区金矿主要产在玲珑、滦家河和郭家岭三大类花岗岩体内及接触带,同时还包括一些基性岩脉。从

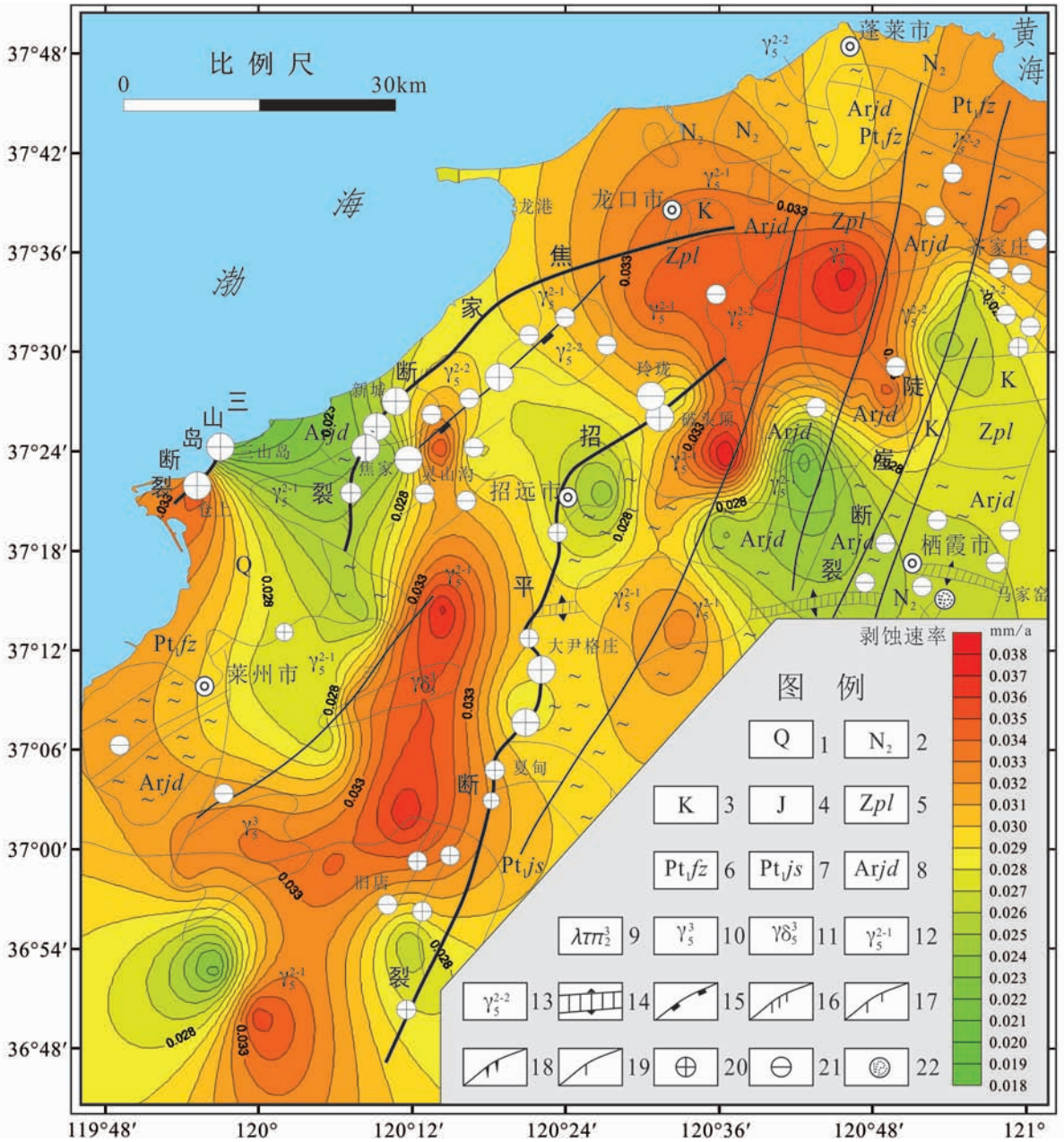


图3 胶东西北部金矿区剥蚀速度分布图(区域地质及金矿分布据翟裕生等,1997 修编)

1-第四系;2-玄武岩;3-白垩系;4-侏罗系;5-蓬莱群;6-粉子山群;7-荆山群;8-胶东群;9-霏细岩;10-花岗岩;11-花岗闪长岩;12-斑状花岗闪长岩;13-斑状花岗岩;14-栖霞复背斜轴;15~19-不同性质的断裂;20-焦家式金矿;21-玲珑式金矿;22-砂金矿

Fig. 3 Regional denudation rate and distribution of gold deposits in the northwestern Jiaodong Gold Province (after Zhai *et al.*, 1997)
 1-Quaternary; 2-basalt; 3-Cretaceous; 4-Jurassic; 5-Penglai Group; 6-Fenzishan Group; 7-Jinshan Group; 8-Jiaodong Group; 9-felsite; 10-granite; 11-granodiorite; 12-porphyritic granodiorite; 13-porphyritic granite; 14-axis of Qixia anticline; 15~19-faults of various natures; 20-Jiaojia-like deposit; 21-Linglong-like deposit; 22-gold placer

形成时间来看,与成矿关系最密切的是郭家岭花岗闪长岩,玲珑花岗岩和滦家河花岗岩仅为容矿围岩。罗镇宽和苗作成(2002)推断金矿与郭家岭花岗岩的直接关系也不大,但是可能存在间接关系。我们本次对花岗岩的构造-热年代学研

究结果显示郭家岭花岗岩所经历的热演化与玲珑花岗岩和滦家河花岗岩明显不同(图4),也可能说明郭家岭花岗岩的成因及金矿关系的特殊性,需进一步开展构造-热年代学研究。

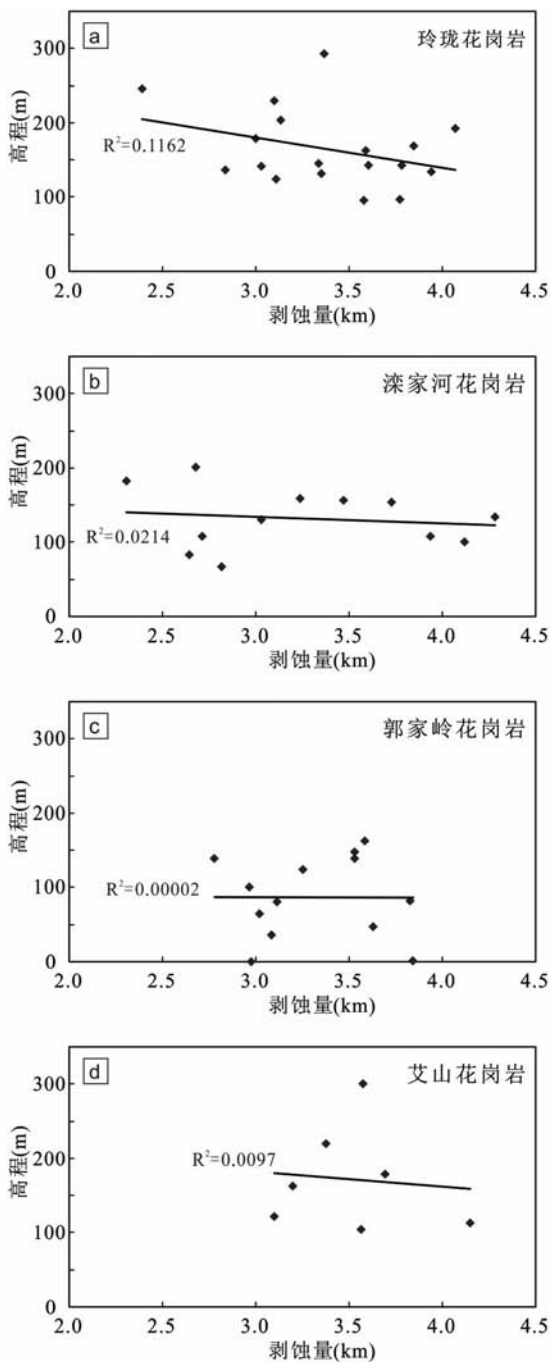


图4 胶东西北部岩体剥蚀量与高程关系图

Fig. 4 Schematic map showing relationship between denudation rate and altitude of granite mass in the northwestern Jiaodong Gold Province

从花岗岩的来源演化来看,玲珑花岗岩 Sr-Nd 同位素组成表明它们来源于加厚下地壳的部分熔融,而郭家岭花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成反映了拆沉的下地壳发生部分熔融并与上涌的软流圈地幔发生相互作用的特征 (Hou *et al.*, 2007)。胶东地区与金矿成矿更为密切的基性岩脉侵位时间

在 125Ma 左右,它们起源于富集而不均一的岩石圈地幔,其富集过程可能与古老的俯冲事件有关 (Yang *et al.*, 2004)。

5.3 胶东西北部金矿的成矿深度

鉴于花岗岩与金矿的紧密关系,可以认为自 110Ma 至今岩体剥蚀的深度 (2.0 ~ 4.3km) 也代表了矿床在此期间经历的剥蚀深度,可通过对比岩体的剥蚀深度与金矿的形成深度进一步分析胶东金矿形成后的变化与保存情况,因此探讨金矿的形成深度有着非常重要的意义。

前人对胶东地区的金矿成矿深度的计算主要有三种方法:一是采用测量流体包裹体压力并依据静水压力和静岩压力梯度进行换算求得成矿深度范围,这是目前应用最广泛的方法,用此方法估算的成矿深度范围见表 3;一种是吕古贤等 (2003) 提出的成岩成矿深度的构造校正测算方法,是从测算压力中先消除掉构造附加静水压力之后再计算上覆岩石厚度,用这一方法测算胶东玲珑-焦家式金矿形成深度仅 3.5km 或更浅,因而提出深部存在第二金矿富集带的预见;还有一种是陈柏林 (2001) 提出根据成矿构造动力学、控矿构造变形的脉动性特征与成矿流体的运移机制、矿物结晶特点等综合因素,结合矿物流体包裹体压力来推算脉状金矿床的成矿深度,估算出焦家金矿床、五河金矿床、大背坞金矿床成矿作用发生于 6 ~ 11 km 的深度。

不同成因类型矿床成矿深度范围是不同的。张德会等 (2007) 总结前人的研究成果综合阐述了不同类型内生矿床的成矿深度和金属沉淀的垂直范围,认为热液成矿作用的深度下限可以下降到 10 ~ 12km,不同类型矿床的成矿深度范围与成矿时的具体地质构造特征有关,且有很大的变化空间。Hagemann and Brown (1996) 认为中温热液脉状金矿床形成于不同时代的区域变质地体中,空间上与消减相关的热事件有关,剪切带、与剪切带伴生的含金石英脉及围岩形成深度的范围变化很大,从近地表 (3 ~ 5km) 到中深成 (15 ~ 20km) 的深度都能发生金的沉淀。陈衍景等 (2007) 建议根据主导成矿系统发育的地质作用特征并以金矿为例划分了五种矿床成因类型:浆控高温热液型、造山型 (即变质热液型)、浅成低温热液型、微细粒浸染型和热水沉积型,不同的成矿系统发育的岩石圈背景不同。胶东金矿区已经确认是形成于大陆后碰撞伸展-岩石圈拆沉体制的造山型金矿省 (蒋少涌等, 2009)。而造山型金矿的形成温度和压力变化范围较大,深度最大可达 25km 以上,浅表至近地表,据此, Groves *et al.* (1998) 提出了地壳连续模式。由于热液矿床形成深度不超过花岗岩浆的产生深度,实验证明在水汽饱和的条件下长英质岩石在 620°C 开始熔融并在 640°C 达到重熔,加之造山带地热梯度多为 $35^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,则造山型矿床形成深度应浅于 18km (陈衍景, 2006),结合本区中生代地热梯度 $44^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ (唐军, 1998) 估算金矿的成矿深度应在 14km 以内。据此,结合前人研究成果 (表 3; 陈柏林, 2001; 吕古贤等, 2003), 综合认为金的成矿深度范围应主要集中于 4 ~ 10km。

表3 胶东西北部主要特大型金矿床成矿深度范围

Table 3 Depth statistics for major gold deposits in the northwestern Jiaodong Gold Province

矿床	主要围岩	早阶段		中阶段		晚阶段		资料来源
		压力 (Mpa)	深度 (km)	压力 (MPa)	深度 (km)	压力 (MPa)	深度 (km)	
三山岛	玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩闪长岩	≥300	≥10.7	120 ~ 200	4.3 ~ 7.1	—	—	Fan <i>et al.</i> , 2003; 陈衍景等, 2009
玲珑	玲珑花岗岩	123, 325	12 ± 4	162 ~ 191	5.8 ~ 6.9	45, 187	4.5, (6.7)	张祖青等, 2007; 陈衍景等, 2009
焦家	玲珑花岗岩	成矿压力: 约 80MPa, 成矿深度: 3.0 ~ 8.2km						王鹤年和汪耀, 1991
河西	玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩闪长岩	成矿压力: 120 ~ 140MPa, 成矿深度: 4.5 ~ 14.2km						徐贵忠等, 2002
大尹格庄	漆家河花岗岩	成矿压力: 24 ~ 115MPa, 成矿深度: 0.9 ~ 11.7km						沈昆等, 2000

注: 焦家、河西、大尹格庄金矿成矿深度由相应文献中的成矿压力换算所得, 深度范围由静岩压力和静水压力给出, 假设岩石密度为 2.7g/cm^3

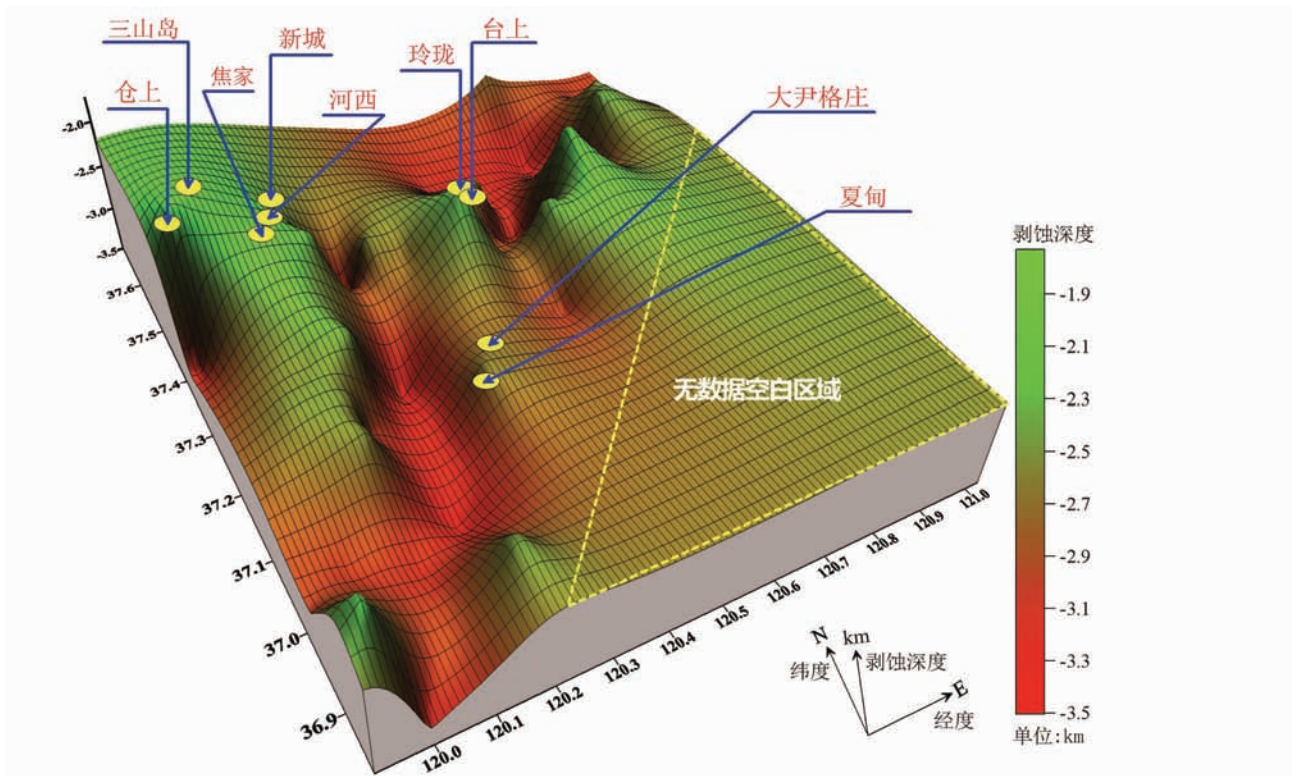


图5 胶东西北部金成矿区 110Ma 以来剥蚀情况

Fig. 5 3D Model for Exhumation in NW Jiaodong Gold Province since 110Ma

5.4 金成矿后的变化保存情况

综合本文的研究结果, 表明自 110Ma 以来本区的剥蚀速率很低, 从图 3 和图 5 可以看出胶西北金成矿区中已知的金矿特别是沿三山岛断裂带、焦家-新城断裂带和招远-平度断裂带分布的大型、特大型矿床如三山岛、焦家、玲珑等区的剥蚀速率均较低, 而剥蚀速率最大的地方目前基本没有金矿产

出, 其最大剥蚀量也不超过 4.5km, 该深度与金晚期成矿深度相当, 远小于最大成矿深度。而陈衍景等(2008)通过成矿年龄与成矿深度对比估算认为 110Ma 以来胶东金矿省的总剥蚀幅度小于 5 ~ 15km, 以上认识包括张华锋等(2006)与本文的研究结果一致, 但本次研究给出了胶东西北部金矿区较为精细的剥蚀情况。

从区域构造演化角度来看, 受燕山期太平洋板块向内陆

板块俯冲构造活动的影响,胶东地区断裂活动强烈,沂沐断裂带巨大平移活动结束,东南沿海地区的火山活动、岩浆侵入活动及陆内造山活动特征表现得十分活跃。张华锋等认为胶东半岛早白垩世 140~110Ma 期间为整体快速隆升和剥蚀阶段(张华锋等,2006),而这一时期尤其是 120Ma 左右正是胶东金矿形成的高峰期,包括胶东在内的中国东部地区在晚侏罗世和白垩纪时期受太平洋板块和 Izanagi 板块俯冲影响,太平洋板块俯冲在 125Ma 左右时发生了近 80°的转折,从而使胶东地区应力场发生了重要转变,并引起大规模岩浆活动及金爆发成矿等效应(Sun *et al.*, 2007)。到燕山晚期末阶段,区内大规模的陆内活动基本结束,盆地消亡,地壳趋于更稳定。进入新生代,区内的主要地质事件为断块构造发展阶段,即主要差异升降活动形成断块和盆岭构造(李士先等,2007)。同时本次通过裂变径迹热年代学的研究结果表明自 110Ma 以来本区的热-构造运动活动规模很小,对矿床的保存非常有利。

综上所述,胶东西北部金矿自形成后遭受剥蚀很少,没有发生大规模破坏作用,非常有利于矿床保存。

6 找矿潜力与方向

目前世界上已知的工业矿化垂向延深最大的金矿床是印度的 Kolar 金矿,该矿沿倾向连续延伸 3.2km(翟裕生等,2004)。本区金矿除了个别金矿如新城 1 号脉、玲南 1 号脉等延深超过 1km 外,其它金矿的矿体控制延深均较小,加之本区金矿剥蚀深度自 110Ma 以来平均在 3.3km 左右,金矿保存条件良好。

当前胶西北地区大部分金矿开采深度尚不足 1km。近几年本区的金矿深部勘探工作不断取得新进展,许多大型矿床的勘查深度已经达到或超过距地表以下 1km(袁文花和王化江,2009),寺庄、焦家金矿床较系统的勘查深度已达地表以下 1~1.1km,其他许多大型以上金矿床探矿深度已达到地表以下 0.8~1.2km,有的深部矿体并未尖灭。相关单位正在全面开展地表以下 1500~2000m 的深部找矿工作,而在三山岛金区,已打出 2km 深的探矿井。

综上所述,并结合本区金矿的成矿深度(集中于 4~10km),当前金矿的开采深度和勘探深度远未达到最大成矿深度范围,因此胶东西北部地区金矿深部找矿前景较为广阔。

7 结论

利用磷灰石裂变径迹热年代学对胶东西北部金成矿区的赋矿围岩——玲珑花岗岩的隆升、剥蚀作用进行深入研究,得出以下结论:

(1) 胶东西北部自燕山运动经历大规模花岗岩侵位和金爆发式成矿后,自 110Ma 以来热-构造运动趋于平静,剥蚀

速率平均仅 $0.0303 \pm 0.0044 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 玲珑花岗岩形成之后,玲珑岩体、滦家河岩体及艾山岩体演化特征较为正常,没有经历复杂的热构造活动。而与金矿形成时代最接近的郭家岭岩体演化特征明显不同,说明郭家岭岩体成因与金矿关系可能存在特殊性,还需要进一步深入研究。

(3) 本区金成矿深度主要集中于 4~10km,花岗岩围岩剥蚀量约 2.0~4.2km,远未达到金最大成矿深度,而金矿自形成后没有经历大规模的热构造破坏活动,矿体保存较为完整。

(4) 当前区内金矿的开采深度平均小于 1km,勘探深度一般小于 2km,结合金矿保存条件、矿体延深及成矿深度范围推测本区金矿的深部找矿潜力良好。

致谢 笔者有幸师从尊敬的翟裕生院士,在治学为人、工作生活等诸多方面得到恩师的悉心指导和关怀,受益匪浅。适逢恩师从事地质工作 60 周年暨 80 华诞之际,谨以此文表示热烈祝贺和感激!衷心感谢北京大学陈衍景教授对本文提出的宝贵意见!感谢中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室谷元珠高级工程师、万景林副研究员在裂变径迹测试过程中的热情指导和大力帮助!感谢中国科学院地质与地球物理研究所张连昌研究员在本文发表过程中提供的帮助。两位审稿专家对本文提出了非常宝贵的修改意见,在此深表感谢!

References

- Cao GQ, Yang ZB and Zhang CJ. 1990. Jiaonan Terrane in Shandong Province and tectonics significance of the Wulian-Rongchen fracture. *Geology of Shandong*, 6(1): 1-15 (in Chinese)
- Chen BL. 2001. Calculation of metallogenic depth of lode gold deposits from mineralization structure-dynamics. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 380-384 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF, Xie Z, Liu SS, Li XM and Foland KA. 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by ^{40}Ar - ^{39}Ar and fission track techniques. *Science in China (Series B)*, 38(6): 749-757
- Chen WJ, Ji FJ and Wang F. 1999. Age Dating of Young Geological Systems (II). Beijing: Seismological Press, 1-269 (in Chinese)
- Chen Y, Zentilli MA, Clark AH, Farrar E, Grist AM and Willis-Richards J. 1996. Geochronological evidence for post-Variscan cooling and uplift of the Carmanellis granite, SW England. *Journal of the Geological Society*, 153: 191-195
- Chen YJ, Pirajno F, Lai Y and Li C. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 907-922 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F and Qi JP. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, Shandong Province, eastern China. *International Geology Review*, 47: 530-549
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33(6): 1181-1196 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold

- deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085–2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Xiao WJ and Zhang JJ. 2008. Ore-system as a geodynamic probe. *Geology in China*, 35(6): 1059–1073 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695–2726 (in Chinese with English abstract)
- Cheng HH, Ma HF and Xiang WD. 2000. Study on changes of existing state of uranium during alkalic metasomatism using fission-track method. *Uranium Geology*, 16(5): 291–296 (in Chinese with English abstract)
- Danišik M, Kohút M, Dunkl I, Hraško L' and Frisch W. 2008. Apatite fission track and (U-Th)/He thermochronology of the Rochovce granite (Slovakia): Implications for the thermal evolution of the Western Carpathian-Pannonian region. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(Suppl.): 225–233
- Donson MH. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological system. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40: 259–279
- Fan HR, Zhai MG, Xie YH and Yang JH. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38: 739–750
- Fan HR, Hu FF, Yang JH, Sheng K and Zhai MG. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1317–1328 (in Chinese with English abstract)
- Galbraith RF. 1981. On statistical models for fission track counts. *Mathematical Geology*, 13: 471–478
- Galbraith RF and Laslett GM. 1993. Statistical models for mixed fission track ages. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21: 459–470
- Gallagher K, Brown R and Johnson C. 1998. Fission track analysis and its applications to geological problems. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 26: 519–572
- Gleadow AJW and Duddy IR. 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks*, 5(1–2): 169–174
- Green PF. 1981. A new look at statistics in fission track dating. *Nuclear Tracks*, 5(1–2): 77–86
- Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M, Hagemanna SG and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5): 7–27
- Groves DI, Condie KC, Goldfarb RJ, Hronsky JMA and Vielreicher RM. 2005. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. *Economic Geology*, 100: 203–224
- Hagemann SG and Brown PE. 1996. Geobarometry in Archean lode-gold deposits. *European Journal of Mineralogy*, 8(5): 937–960
- Hansen K. 1995. Fennoscandian Border zone: Thermal and tectonic history of a tuffaceous sandstone and granite from fission track analysis, Bornholm, Denmark. *Tectonophysics*, 244(1–3): 153–160
- Hessa JC, Lippolita HJ, Gurbanov AG and Michalski I. 1993. The cooling history of the Late Pliocene Eldzhurtinskiy granite (Caucasus, Russia) and the thermochronological potential of grain-size/age relationships. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3–4): 393–406
- Hou ML, Jiang SY and Jiang YH. 2006. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525–2533 (in Chinese with English abstract)
- Hou ML, Jiang YH, Jiang SY, Ling HF and Zhao KD. 2007. Contrasting origins of Late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, East China: Implications for crustal thickening to delamination. *Geological Magazine*, 144(4): 619–631
- Hu SX, Wang HN, Wang DZ, Zhang JR and Zhao YY. 1998. *Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China*. Beijing: Science Press, 1–343 (in Chinese)
- Hurford AJ and Green PF. 1982. A users' guide to fission track dating calibration. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2): 343–354
- Jaques LA, Wyborn LAI and Gallaghe R. 1994. The role of geographic information system, empirical modeling and expert systems in metallogenic research. 12th Australian Geological Convention, Geological Society of Australia, Abstracts, No. 37. Perth, 196–197
- Jiang SY, Dai BZ, Jiang YH, Zhao HX and Hou ML. 2009. Jiaodong and Xiaolin: Two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2727–2738 (in Chinese with English abstract)
- Kesler SE and Wilkinson BH. 2006. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits. *Economic Geology*, 101(5): 919–922
- Li L and Zhong DL. 2006. Fission track evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 457–464 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Chen FK, Yang JH and Fan HR. 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 263–270
- Li SX, Liu CC, An YH, Wang WC, Huang TL and Yang CH. 2007. *Geology of Gold Deposits in Jiaodong*. Beijing: Geological Publishing House, 1–423 (in Chinese)
- Li XM and Foland KA. 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by ⁴⁰Ar-³⁹Ar and fission track techniques. *Science in China (Series B)*, 38(6): 749–757
- Li XM. 2001. Metallogenic age of Jinman copper deposit in western Yunnan Province, China. *Geoscience*, 15(4): 52–55 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL and Yang MZ. 1993. *The Geology-Geochemistry of Gold Deposits in Jiaodong Region*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 168–189 (in Chinese with English abstract)
- Lim HS and Lee YI. 2005. Cooling history of the upper Cretaceous Palgongsan granite, Gyeongang basin, SE Korea and its tectonic implication for uplift on the active continental margin. *Tectonophysics*, 403: 151–165
- Liu CY, Zhao HG and Gui XJ. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617–638 (in Chinese with English abstract)
- Lü GX, Lin WW and Luo YH. 1999. *Tectonophysicochemistry and Gold Metallogenic Prognosis*. Beijing: Geological Publishing House, 1–458 (in Chinese with English abstract)
- Lü GX, Liu RX, Wang FZ, Guo T, Shu B, Xia L and Liu DJ. 2003. Theoretical basis, method and calculation on tectono-corrected depth of petrogenesis and metallogenesis. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 546–563 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZK and Miao LC. 2002. *Granites and Gold Deposits in Zhaoyuan-Laizhou Area, Eastern Shandong Province*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1–157 (in Chinese)
- Maksaev V, Munizaga F, Zentilli M and Charrier R. 2009. Fission track thermochronology of Neogene plutons in the Principal Andean Cordillera of central Chile (33–35 degrees S): Implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization. *Andean Geology*, 36(2): 153–171
- Qiu YM, Groves DI, McNaughton NJ, Wang LG and Zhou TH. 2002. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold

- deposits of Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Mineral. Deposita*, 37: 283 – 305
- Qiu ZL, Qin SC and Zhang BT. 1995. A study of the existing form and distribution of uranium in host volcanic rock in the 670 deposit. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 15(1): 37 – 41 (in Chinese with English abstract)
- Reiners PW and Brandon MT. 2006. Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 34: 419 – 466
- Shen CB, Mei LF, Fan YF and Tang JG. 2005. Advances and prospects of Apatite Fission Track thermochronology. *Geological Science and Technology Information*, 24(2): 59 – 65 (in Chinese with English abstract)
- Shen K, Hu SX, Sun JG, Lin HF, Zhao YY and Sun MZ. 2000. Characteristics of ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit in eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 542 – 550 (in Chinese with English abstract)
- Shi XB, Qiu XL, Liu HL, Chu ZY and Xia B. 2006. Thermochronological analyses on the cooling history of the Lincang granitoid batholith, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 465 – 479 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533 – 542
- Tang J. 1998. Study on Palaeogeothermal gradient and hydrocarbon generation in North China. *Henan Petroleum*, 12(6): 1 – 3 (in Chinese with English abstract)
- Wang GC and Yang WR. 1998. Accelerated exhumation during the Cenozoic in the Dabie Mountains: Evidence from fission-track ages. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 409 – 419
- Wang HN and Wang Y. 1991. The genesis of the Jiaojia gold deposit, Shandong. *Geological Review*, 37(3): 250 – 257 (in Chinese with English abstract)
- Wang JP, Zhai YS, Liu JJ, Liu ZJ and Liu J. 2008. A new approach to post-ore change and preservation of ore deposits: Fission track analysis. *Advances in Earth Science*, 23(4): 421 – 427 (in Chinese with English abstract)
- Wang LC, Qiu YM, McNaughton NJ, Groves DI, Luo ZK, Huang JZ, Miao LC and Liu YK. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of Granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 275 – 291
- Wang Y. 2004. Some thoughts on tectono-thermochronology. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 435 – 443 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Zhou LY. 2008. From isotopic chronology to tectonic chronology. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2014 – 2019 (in Chinese with English abstract)
- Wilkinson BH and Kesler SE. 2007. Tectonism and exhumation in convergent margin orogens: Insights from ore deposits. *The Journal of Geology*, 115: 611 – 627
- Wu FY, Xu YG, Gao S and Zheng JP. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145 – 1174 (in Chinese with English abstract)
- Xu CZ, Ying HL, Zhou R, She HQ, Yan Z, Wang YF and Li B. 2002. Genesis and dynamic condition of Hexi gold deposit in Northwest Jiaodong area. *Mineral Deposits*, 21(3): 246 – 255 (in Chinese with English abstract)
- Xu JH, Xie YL and Shen SL. 1997. A comparison of ore forming fluids between gold deposits in Xiaoqinling Mountains and those in Jiaodong Peninsula. *Mineral Deposits*, 16(2): 151 – 162 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chung SL, Zhai MG and Zhou XH. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145 – 160
- Yin GM, Lu YC, Zhao H, Li WL, Li L and Guo SL. 2001. The tectonic uplift of the Huashan in the Cenozoic. *Chinese Science Bulletin*, 46(19): 1665 – 1668
- Yuan WM, Wang SC and Wang LF. 1999. Fission track study on the metallogenetic age of Xiayingfang gold deposit in eastern Hebei. *Nuclear Techniques*, 22(7): 411 – 413 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Wang SC and Wang LF. 2000. Metallogenic thermal history of the Wulonggou gold deposits in East Kunlun Mountains in the light of fission track thermochronology. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 389 – 395 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Wang SC and Wang LF. 2001. Apatite and zircon fission track study on the mineralization age and its thermal history of Nanliang gold deposit, eastern Hebei, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 225 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Wang SC and Li SR. 2002. Fission track study on the metallogenetic age of Au-Cu hydrothermal deposit in southern margin of Lhasa Block. *Progress in Natural Science*, 12(5): 95 – 98 (in Chinese)
- Yuan WM, Bao ZK, Dong JQ, Guo ZJ and Deng J. 2007. Zircon and apatite fission track analyses on mineralization ages and tectonic activities of Tuwu-Yandong porphyry copper deposit in northern Xinjiang, China. *Science in China (Series D)*, 50(12): 1787 – 1795
- Yuan WH and Wang HJ. 2009. Contrast study on orebody characteristics between deep and shallow part of “Jiaojia Type” typical gold deposits in northwestern Shandong Province. *Land and Resources in Shandong Province*, 25(5): 20 – 29 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS. 1993. Formation and modification of Quaternary ore deposits. Symposium on the 100th Birth Anniversary of Professor Yuan FL. Wuhan: China University of Geosciences Press, 175 – 178 (in Chinese)
- Zhai YS. 1997. A Discussion on the Post-ore Change and Preservation of Ore Deposits. *Geosciences Research*, No. 29 – 30. Beijing: Geological Publishing House, 267 – 273 (in Chinese)
- Zhai YS, Zhang H, Song HL, Deng J and Cheng XJ. 1997. Macroscopic Structures and Superlarge Ore Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 107 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS. 2000. Metallogenic system and its evolution: From preliminary practice to theoretical. *Earth Science*, 25(4): 333 – 339 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Deng J and Peng RM. 2000. Research contents and methods for post-ore changes, modifications and preservation. *Earth Science*, 25(4): 340 – 345 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Deng J, Wang JP, Peng RM, Liu JJ and Yang LQ. 2004. Research on deep ore prospecting. *Mineral Deposits*, 23(2): 142 – 149 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS. 2007. Earth system, metallogenic system to exploration system. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 172 – 181 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DH, Zhou SH, Wan TF, Xi BB and Li JP. 2007. Depth of ore deposit formation and prognosis of deep-seated ore deposits. *Geological Bulletin of China*, 26(12): 1509 – 1518 (in Chinese with English abstract)
- Zhang F, Liu TG and Zhang FX. 1996. Fission track study of mineralization age in Bayan Obo main orebody. *Chinese Science Bulletin*, 41(6): 54 – 56 (in Chinese)
- Zhang HF, Li SR, Zhai MG and Guo JH. 2006. Crust uplift and its implications in the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 285 – 295 (in Chinese with English abstract)

- Zhang SZ, Hua RM, Deng P, Zhu B, Wu LQ, Zhang YC, Tan ZZ and Yin ZP. 2005. Geological and geochemical characteristics of water-rock interaction in the processes of uranium mineralization in Zhuguang-Xiazhuang uranium ore-concentrated district. *Geochimica*, 34(5): 483–494 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XM and Wang Y. 2004. Geothermochronology and orogen uplift erosion rate: Constraints for paleogeothermal gradient. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 243–244 (in Chinese)
- Zhang ZQ, Lai Y and Chen YJ. 2007. Fluid inclusion study of the Lingiong gold deposit, Shandong Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2207–2216 (in Chinese with English abstract)
- Zheng DW, Zhang PZ, Wan JL, Yan DY, Zhang GL and Li CY. 2005. Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(1): 157–164 (in Chinese with English abstract)
- Zhou J, Liu JC, Wang RT, Zhang HS, Zhang ZK, Zhang KH and Liu Z. 2001. Gold metallogeny of the Shandong Peninsula Gold Province, China. *Journal of Xi'an Engineering University*, 23(3): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 曹国权, 王致本, 张成基. 1990. 山东胶南地体及其边界断层五连-荣成断裂的构造意义. *山东地质*, 6(1): 1–14
- 陈柏林. 2001. 从成矿构造动力学探讨脉状金矿床成矿深度. *地质科学*, 36(3): 380–384
- 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 李学明, Foland KA. 1995. 大别造山带冷却年龄的⁴⁰Ar/³⁹Ar和裂变径迹年龄测定. *中国科学(B辑)*, 25(10): 1086–1092
- 陈文寄, 计凤桔, 王非. 1999. 年轻地质体系的年代测定(续)——新方法、新进展. 北京: 地震出版社, 1–269
- 陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. *岩石学报*, 20(4): 907–922
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. *中国地质*, 33(6): 1181–1196
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35(6): 1059–1073
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25(11): 2695–2726
- 程华汉, 马汉峰, 向伟东. 2000. 利用裂变径迹方法研究碱交代作用中铀赋存状态的变化. *铀矿地质*, 16(5): 291–296
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. *岩石学报*, 21(5): 1317–1328
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金矿成矿区的S-Pb同位素地球化学和Rb-Sr同位素年代学研究. *岩石学报*, 22(10): 2525–2533
- 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 张景荣, 赵懿英. 1998. 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京: 科学出版社, 1–343
- 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 赵海香, 侯明兰. 2009. 胶东和小秦岭: 两类不同构造环境中的造山型金矿省. *岩石学报*, 25(11): 2727–2738
- 李理, 钟大赉. 2006. 泰山新生代抬升的裂变径迹证据. *岩石学报*, 22(2): 457–464
- 李士先, 刘长春, 安郁宏, 王为聪, 黄太岭, 杨承海. 2007. 胶东金矿地质. 北京: 地质出版社, 1–423
- 李小明. 2001. 滇西金满铜矿床成矿年龄测定. *现代地质*, 15(4): 52–55
- 李兆龙, 杨敏之. 1993. 胶东金矿地质地球化学. 天津: 天津科学技术出版社, 168–189
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 80(5): 617–638
- 吕古贤, 林文尉, 罗元华. 1999. 构造物理化学与金矿成矿预测. 北京: 地质出版社, 1–458
- 吕古贤, 刘瑞珣, 王方正, 郭涛, 舒斌, 夏林, 刘杜娟. 2003. 关于成岩成矿深度构造校正测算的理论基础、方法和实例. *地质科学*, 38(4): 546–563
- 罗镇宽, 苗来成. 2002. 胶东招莱地区花岗岩和金矿床. 北京: 冶金工业出版社, 1–157
- 丘志力, 秦社彩, 章邦桐. 1995. 670矿床火山围岩铀赋存状态及配分研究. *矿物岩石*, 15(1): 37–41
- 沈传波, 梅廉夫, 凡元芳, 汤济广. 2005. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望. *地质科技情报*, 24(2): 59–65
- 沈昆, 胡受奚, 孙景贵, 凌洪飞, 赵懿英, 孙明志. 2000. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征. *岩石学报*, 16(4): 542–550
- 施小斌, 丘学林, 刘海龄, 储著银, 夏斌. 2006. 滇西临沧花岗岩基冷却的热年代学分析. *岩石学报*, 22(2): 465–479
- 唐军. 1998. 华北地区古地温梯度研究与古生界油气生成. *河南石油*, 12(6): 1–3
- 王鹤年, 汪耀. 1991. 山东焦家金矿床的成因探讨. *地质论评*, 37(3): 250–257
- 王建平, 翟裕生, 刘家军, 柳振江, 刘俊. 2008. 矿床变化与保存研究的裂变径迹新途径. *自然科学进展*, 23(4): 421–427
- 王瑜. 2004. 构造热年代学——发展与思考. *地学前缘*, 11(4): 435–443
- 王瑜, 周丽云. 2008. 从同位素年代学到构造年代学. *地质通报*, 27(12): 2014–2019
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. *岩石学报*, 24(6): 1145–1174
- 徐贵忠, 应汉龙, 周瑞, 余宏全, 闫臻, 王艺芬, 李兵. 2002. 论胶西北河西金矿床成因及其动力学条件. *矿床地质*, 21(3): 246–255
- 徐九华, 谢玉玲, 申世亮. 1997. 小秦岭与胶东金矿床的成矿流体特征对比. *矿床地质*, 16(2): 151–162
- 袁万明, 王世成, 王兰芬. 1999. 河北下营坊金矿成矿时代的裂变径迹研究. *核技术*, 22(7): 411–413
- 袁万明, 王世成, 王兰芬. 2000. 东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史的裂变径迹热年代学证据. *地球学报*, 21(4): 389–395
- 袁万明, 王世成, 王兰芬. 2001. 裂变径迹分析法研究河北南梁金矿床成矿时代及其热历史. *矿物学报*, 21(2): 225–230
- 袁万明, 王世成, 李胜荣, 杨志强, 王兰芬. 2002. 拉萨地块南缘热液金铜矿床成矿时代的裂变径迹研究. *自然科学进展*, 12(5):

95-98

- 袁万明, 保增宽, 董金泉, 郭召杰, 邓军. 2007. 新疆土屋-延东斑岩铜矿区成矿时代与构造活动的裂变径迹分析. 中国科学(D辑), 37(10): 1330-1337
- 袁文花, 王化江. 2009. 胶西北地区“焦家式”典型金矿床深部与浅部矿体特征对比研究, 山东国土资源, 25(5): 20-29
- 翟裕生. 1993. 第四纪时期矿床的形成和改造. 袁复礼教授诞辰一百周年学术讨论会论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 175-178
- 翟裕生. 1997. 论矿床形成后的改变与保存. 地学研究, 第29~30号, 北京: 地质出版社, 267-273
- 翟裕生, 张湖, 宋鸿林, 邓军, 程小久. 1997. 大型构造与超大型矿床. 北京: 地质出版社, 107-110
- 翟裕生. 2000. 成矿系统及其演化——初步实践到理论思考. 地球科学, 25(4): 333-339
- 翟裕生, 邓军, 彭润民. 2000. 矿床变化与保存的研究内容和研究方法. 地球科学, 25(4): 340-345
- 翟裕生, 邓军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 2004. 深部找矿研究问题. 矿床地质, 23(2): 142-149
- 翟裕生. 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统. 地学前缘, 14(1): 172-181
- 张德会, 周圣华, 万天丰, 席斌斌, 李建平. 2007. 矿床形成深度与深部成矿预测. 地质通报, 26(12): 1509-1518
- 张峰, 刘铁庚, 张凤祥. 1996. 裂变径迹研究白云鄂博主矿的成矿年龄. 科学通报, 41(6): 54-56
- 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义. 岩石学报, 22(2): 285-295
- 张学民, 王瑜. 2004. 热年代学与造山带隆升剥蚀速率——古地温梯度的制约. 地学前缘, 11(3): 243-244
- 张展适, 华仁民, 邓平, 朱捌, 吴烈勤, 张彦春, 谭正中, 尹征平. 2005. 诸广-下庄铀矿集区成矿过程中水-岩作用的地质地球化学特征. 地球化学, 34(5): 483-494
- 张祖青, 赖勇, 陈衍景. 2007. 山东玲珑金矿流体包裹体地球化学特征. 岩石学报, 23(9): 2207-2216
- 郑德文, 张培震, 万景林, 袁道阳, 张广良, 李传友. 2005. 六盘山盆地地热历史的裂变径迹证据. 地球物理学报, 48(1): 157-164
- 周军, 刘建朝, 王瑞腾, 张洪山, 张振开, 张可海, 刘忠. 2001. 胶东金矿省成矿作用初析. 西安工程学院学报, 23(3): 1-10