

论地球化学外能与内能的转换

洪庆玉

邓 涛

(研究生部)

(石油勘探系)

摘要 岩石在地表条件下具有 q 值增大规律。岩浆岩和变质岩在地表条件下,吸收太阳等宇宙能转化成沉积岩;在地壳深处,沉积岩释放这些能量转化成岩浆岩或变质岩。能量的上述转换,是通过内生的低晶格能矿物与外生的高晶格能矿物负载者实现的;是通过硅、铝主导控制元素,以及氧、钠、钾、钙、镁和铁等实现的。外能补充内能并通过内能起作用,从而成为改造地球面貌的宏伟运动。

关键词 岩相演变;晶格能;能量转换;地球化学

前 言

在地球表面上不断进行着风化作用和沉积作用,我们称其为表生作用。以前,不少人认为不仅内力作用需要地球内部能量供给,就是地球上的气候和生物也都需要地球内部供给能量,自然,表生作用所需要的能量也来自地球内部。随着科学技术的发展,大量野外观察所积累的资料,以及晶体化学研究所取得的成果,打破旧有的观点,改变内能支配一切的看法。表生作用的能量来源主要是太阳的辐射能,根据H·J·勒斯勒等(1972)研究,太阳、月球、宇宙射线和流星等对地球表面每秒作用能量为 $1.76 \times 10^{17} \text{J}$ (焦耳),其中太阳热辐射占99.998%,太阳作用到地球表面的能量,大约是地球内部流到地表热量的5000~10000倍^[1]。所以太阳能决定表生带的温度,造成大气圈和水圈的运动,决定生物有机体的活动,支配表生带的元素迁移和集中。

根据热力学第一定律,若环境对体系加热,或对它作功,或二者同时进行,其内能将增加。因此,在地球化学过程中,外部的宇宙能,主要是太阳能也是地球内部能量的供给者和补充者;这样就将改造地球面貌的内力和外力地质作用,从能量观点上统一起来。

H·B·别洛夫等(1957)最早阐述以上观点^[2],洪庆玉(1958~今)的一系列研究也应用了这种思想,并使其更加充实和完善^[3,4,5,6,7]。但是,由于地球化学过程的复杂,其能量供给和转换也必然是十分复杂的。因此,地球外部的太阳能,仅是供给地球内部能量的一个重要来源。

1 沉积岩是能量转换的媒介

根据统计, 沉积岩占地壳表面积的75%, 岩浆岩和变质岩仅占25%; 按地壳重量计算, 岩浆岩和变质岩占95%, 沉积岩仅占5%。在地质历史发展过程中, 沉积岩无论数量或分布面积都不断地扩大; 追溯沉积岩的不断增长的历史, 就是岩浆岩和变质岩的破坏转变历史。

对大量岩石的晶格能计算^(3,6)表明(见表1), 岩浆岩和变质岩的 $q \leq 45$, 沉积岩的 $q \geq 45$ 。所以, 岩石在地表风化条件下的变化, 具有 q 值增大规律。 q 值增大规律进一步从岩石本质特性上说明, 内力作用生成的岩浆岩和变质岩在地表风化条件下不是放能过程, 而是吸收能量转化成沉积岩; 这就是沉积岩随着地质历史的发展, 不断增多的根本原因。

表1 三大岩类岩石晶格能及其对比

类型	岩石	晶格能参数			晶格能量标		
		μ_a	μ_a'	R	q	$q \cdot \mu_a'$	$q \cdot \mu_a$
变质岩	斜长片麻岩 (2)	62.84	22.00	2.857	35.67	784.74	2241.50
	长英片麻岩 (2)	63.34	20.35	3.112	43.50	885.23	2798.79
	斜长花岗岩片麻岩	62.97	20.01	3.147	45.34	907.25	2855.06
	条痕与眼球混合岩	64.85	20.38	3.182	44.25	901.82	2869.61
	算术平均值	63.50	20.69	3.069	42.19	872.91	2679.07
岩浆岩	超基性岩 (14)	52.84	20.34	2.600	35.96	731.43	1900.13
	辉长岩 (59)	61.27	20.94	2.926	37.97	795.09	2326.42
	玄武岩 (166)	62.83	21.24	2.958	37.90	805.00	2381.26
	闪长岩 (17)	64.14	20.83	3.079	40.96	853.20	2627.17
	安山岩 (64)	64.68	20.90	3.095	41.54	868.19	2686.81
	正长岩 (27)	67.31	20.91	3.219	42.19	882.19	2839.81
	粗面岩 (24)	66.70	20.93	3.187	42.66	892.87	2845.42
	酸性岩 (318)	64.17	20.47	3.135	44.77	916.44	2872.89
	花岗岩 (221)	64.47	20.47	3.149	44.82	917.77	2889.55
流纹岩 (23)	64.64	20.50	3.153	44.99	922.30	2908.15	
沉积岩	石灰岩 (345)	48.61	19.41	2.504	49.90	968.56	2425.64
	白云岩	46.17	18.41	2.508	54.81	1009.05	2530.58
	粘土岩	*64.69	19.21	3.368	45.20	868.29	2923.99
	砂岩 (624)	61.46	19.39	3.170	50.39	977.06	3096.97

注: 此表绝大多数数据取自参考文献(6)的表2。 μ_a 为克/克分子, μ_a' 为克/克原子
 $R = \mu_a / \mu_a'$

参照维诺格拉多夫平均岩浆岩计算是花岗岩65%和玄武岩35%的比例。根据表1的数据计算,平均岩浆岩的晶格能 $q \cdot \mu_n$ 为 $2711.65 \times 4.184 \text{KJ/mol}$;参照莱斯和米德平均沉积岩的计算,是粘土岩82%、砂岩12%和灰岩6%的比例,根据表1的数据计算,平均沉积岩的晶格能 $q \cdot \mu_n$ 为 $2914.85 \times 4.184 \text{KJ/mol}$;平均变质岩的晶格能就是表1的算术平均值,其 $q \cdot \mu_n$ 为 $2679.07 \times 4.184 \text{KJ/mol}$ 。

上述计算结果表明,一摩尔分子的岩浆岩受太阳能支配的各种风化因素作用,发生风化并逐渐转化为沉积岩的过程,需要吸收 $203.20 \times 4.184 \text{KJ}$ 能量;同理,一摩尔分子的变质岩需要吸收 $235.78 \times 4.184 \text{KJ}$ 能量。反之,沉积岩由于地壳运动下降到地壳深处,转化成岩浆岩或变质岩时,必然放出相同数量的能量。所以,地球化学过程的能量转换,从岩石学观点看,内力作用生成的岩浆岩和变质岩在地表风化条件下,不是放能而是吸能过程;外力作用生成的沉积岩累积太阳能,到地壳深处将能量释放出去。所以,沉积岩是太阳能转化为地球内能的媒介。

2 矿物是能量转换的负载者

岩石是矿物有规律分布的集合体,岩石的地球化学性质主要取决于所含的矿物成分。如果其中所含的矿物是高晶格能矿物占多数,此种岩石也必定是高晶格能的;反之,岩石所含的矿物是低晶格能矿物占多数,此种岩石必定是低晶格能的。

根据什维佐夫统计的同种矿物在岩浆岩与沉积岩中所占的重量百分比(见表2),

表2 造岩矿物在岩浆岩和沉积岩的分布

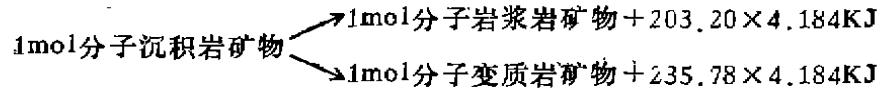
矿 物	在岩石中的重量%		变 化 量 %	晶格能 $q \cdot \mu_n$ $\times 4.184$ KJ/mol	以石英 $q \cdot \mu_n$ 作为100% 的指数	按 $q \cdot \mu_n$ 对矿物 的分类
	岩浆岩	沉积岩				
橄 榄 石(13)	2.65		-100	1697.58	53.37	低 能 矿 物
普通辉石(30)	12.90		-100	2054.46	64.59	
普通角闪石(24)	1.60		-100	2140.80	67.31	
黑 云 母(34)	3.86		-100	2148.82	67.56	
合计或平均值	21.01		-100	2005.92	63.07	
钙 长 石(理)	9.80		-100	2692.57	84.66	低中能矿物
钠 长 石(59)	25.60	4.55	-82.23	2850.94	89.64	高 中 能 矿 物
钾 长 石(106)	14.85	11.02	-25.79	2876.32	90.43	
合计或平均值	40.45	15.57	-61.51	2863.63	90.04	
高 岭 石(理)		14.51	+100	*2936.95	92.34	高 能 矿 物
白 云 母(47)	3.85	15.11	+392.47	*3196.25	100.49	
石 英(理)	20.40	34.80	+170.59	3180.56	100	
合计或平均值	24.25	64.42	+265.65	3104.59	97.61	

注: 1. 此表矿物在岩石中的含量取据什维佐夫《沉积岩石学》;

2. 晶格能数据相同表3。*者为晶格能 $n=4$ 的数据。

岩浆岩中低晶格能矿物占21.01%，低中晶格能矿物占9.8%，高中晶格能矿物占40.45%，高晶格能矿物仅占24.25%；但在沉积岩中，无低晶格能矿物，无低中晶格能矿物，高中晶格能矿物占15.57%，高晶格能矿物多达64.42%。

在地表条件下，内生的低晶格能矿物让位于外生的高晶格能矿物的事实，突出地表现了内生矿物在地表风化作用条件下不是放出能量，而是吸收能量(4,6)；外生的高晶格能矿物由于地壳运动沉降到地壳深处，在新的物理化学条件和热液组分参预下变成新的矿物，组成新的岩石类型，不是吸收能量而是放出能量。即：



所以，从矿物学观点看，地球化学的能量过程是低晶格能的内生矿物在地表条件下吸收能量，转变成高晶格能的沉积矿物；高晶格能的沉积矿物，在地壳深部放出能量而变成内生的低晶格能矿物。因此，与其说沉积岩是太阳能转化成内能的媒介，不如说沉积岩中的高晶格能矿物，是能量转换的负载者。

3 元素是能量转换的承受者

元素组成了矿物，它在能量转换过程中的负载作用，必然取决于化学成分和结晶构造的变化。

根据简化的鲍温反应系列(参见图1)：

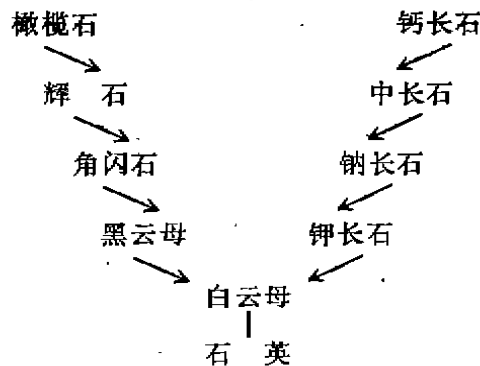


图1 鲍温反应系列简图

在暗色矿物系列里，橄榄石~黑云母，从结晶构造观点看，它们是由岛状经链状到层状；从化学观点看，主要阳离子是Mg和Fe，Si含量由少到多；从能量观点看，它们是从小到大(见表2)。从岛状到层状是Si—O四面体连接形态的高级化，是Si多的结果；伴随Si—O四面体连接形态的高级化，是更多的氧负电价为高能量的硅占有的结果。所以，在这一系列里，Si是控制的主导因素。

在浅色矿物系列里，钙长石~钾长石，从结晶构造观点看，全为架状；从化学观点看，主要阳离子是Ca、Na、K、Al从多到少，Si从少到多；从能量观点，它们是从小到大(见表2)，Al代替Si越多能量越小。所以，在这一系列里，Al是控制的主导

因素。

硅酸盐结晶构造的X射线分析表明,硅氧四面体是所有硅酸盐的基本构造单位。按照Si—O的结合力和O—O间斥力,它们分别为:

$$f_{s-o} = -\frac{2 \times 4}{(0.4 + 1.4)^2} \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N} = -2.47 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$$

$$f_{o-o} = \frac{2 \times 2}{(1.4 + 1.4)^2} \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N} = 0.51 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$$

在 Si^{4+} 周围可有四个 O^{2-} 围绕而构成牢固的 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 四面体,并有余力 $0.43 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$ 。根据电价规则, $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 四面体的每一角顶最多只能公用于两个 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 四面体之间;这就决定其基本构造单位——硅氧四面体或代换的铝氧四面体,可以相互孤立,或以其角顶相互连接。作者计算了11个络阴离子及其代表矿物的晶格能(见表3),根据对各种四面体连接形态的理论计算,可得如下重要结论:

第一,硅氧四面体从岛状到架状的演变过程,是晶格能依次有规律地增大过程。假若以岛状硅氧四面体的 $q \cdot \mu_n' = 771.75 \times 4.184 \text{KJ/mol}$ 为背景值,单链状 $q \cdot \mu_n'$ 增加14.16%、双链状 $q \cdot \mu_n'$ 增加18.89%、层状 $q \cdot \mu_n'$ 增加24.05%、架状 $q \cdot \mu_n'$ 增加37.37%,这些四面体的典型代表矿物的 $q \cdot \mu_n'$ 同样是增大的(见表3)。

第二,硅铝氧四面体连接形态的 $q \cdot \mu_n'$,是该类型可能出现的主要造岩矿物 $q \cdot \mu_n'$ 的极限值(表3)。

第三,在硅酸盐里,特别在双链状、层状和架状硅酸盐里,广泛发育 Al^{3+} 代 Si^{4+} ,即 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 代替部分 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 。从表3不难看出, Al^{3+} 代 Si^{4+} 的过程最主要是使四面体群及其代表矿物的 q 值降低过程, Al^{3+} 代 Si^{4+} 越多 q 值降低越甚。譬如,普通角闪石较透闪石的 q 降低10.36%,黑云母较滑石的 q 降低22.09%,钾长石较石英的 q 降低19.99%。

为什么部分 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 代替 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 是 q 值的降低呢?还得从Al—O四面体结合力找答案。

$$f_{\text{Al}-o} = -\frac{2 \times 3}{(0.49 + 1.4)^2} \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N} = -1.64 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$$

四面体氧间斥力为 $2.04 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$,因 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 形成发生键力亏损 $0.36 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$;何况 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 四面体中的 Al^{3+} 离子只能给予 O^{2-} 的 $\frac{3}{4}$ 个正电价,同样使键力减弱25%。所以, Al^{3+} 在正常和一般情况下是不能形成 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 四面体的。但在内力地质作用过程中,广泛大量地发育 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 代替部分 $(\text{SiO}_4)^{4-}$,完全是迎合

$\frac{\text{Na} + \text{K} + \text{Ca}}{\text{Mg} + \text{Fe}} > 1$ 的质量作用定律而出现的调节作用⁽⁵⁾。所以,铝在内力地质作用代替部分硅组织起能量亏损的硅铝氧四面体群,吸收 Ca^{2+} 、 Na^{1+} 、 K^{1+} 等阳离子成矿;在地表风化条件下,由于 Al^{3+} 代 Si^{4+} 是能量亏损因此铝硅酸盐不稳定,在吸收能量补差亏损的风化条件下铝硅酸盐破坏, Ca^{2+} 、 Na^{1+} 、 K^{1+} 等分离出来, Al^{3+} 也再不代 Si^{4+} ,按其本性成六次配位数的阳离子, Al_2O_3 结合力 $f_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -\frac{2(2 \times 3)}{(0.51 + 1.4)^2} \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$

$= -3.29 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$,氧间斥力 $1.53 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$,构成一个牢固的 Al_2O_3 并有余

表3 硅铝氧四面体连接形态及代表矿物晶格能比较

连接形态	能量参数				代表矿物	q	μ_n'	R	$q \cdot \mu_n'$	$q \cdot \mu_n$
	q	μ_n'	$q \cdot \mu_n'$							
岛状	$(\text{SiO}_4)^{4-}$	41.92	18.41	771.75	镁橄榄石(理)	35.82	20.10	2.333	719.98	1679.72
					橄榄石(13)	34.13	21.04	2.364	718.31	1697.58
单链状	$(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$	46.32	19.02	881.01	透辉石(理)	37.43	21.66	2.500	810.73	2026.83
					普通辉石(30)	36.37	21.81	2.590	793.23	2054.46
双链状	$(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$	47.74	19.22	917.56	透闪石(理)	40.16	19.81	2.563	795.57	2039.04
	$(\text{AlSi}_3\text{O}_{11})^{7-}$	43.58	19.14	834.12	普通角闪石(24)	36.00	21.64	2.748	779.04	2140.80
层状	$(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$	49.22	19.45	957.33	滑石(理)	43.28	18.06	2.625	781.64	2051.80
	$(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})^{6-}$	44.98	19.38	871.71	黑云母(34)	33.72	21.37	2.982	720.60	2148.82
					白云母(37)	39.99	18.74	3.412	749.41	2557.60
架	$(\text{Si}_4\text{O}_8)^0$	52.93	20.03	1060.19	石英(理)	52.93	20.03	3.000	1060.19	3180.56
					钾长石(106)	42.35	20.93	3.245	886.39	2876.32
	$(\text{AlSi}_3\text{O}_8)^{1-}$	48.08	19.95	959.20	钠长石(59)	43.37	20.22	3.251	876.94	2850.94
					中长石(26)	41.37	20.34	3.241	841.47	2727.19
	$(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)^{2-}$	43.17	19.85	856.92	拉长石(69)	40.39	20.76	3.249	838.50	2724.27
					钙长石(理)	38.66	21.43	3.250	828.48	2692.57
状	$(\text{AlSiO}_4)^{1-}$	42.88	19.85	851.17	霞石(理)	37.07	20.29	3.500	752.15	2632.53
					霞石(16)	37.55	20.26	3.449	760.76	2623.86
	$(\text{AlSi}_2\text{O}_6)^{1-}$	46.02	19.92	916.72	白榴石(理)	38.57	21.82	3.333	841.60	2805.05

注：此表各项数据取据参考文献[7]

力 $1.76 \times 4.8 \times 10^{-8} \text{N}$ 。

第四，类质同象代换是R值的增大，是对晶格能 $q \cdot \mu_0$ 的贡献过程。 Al^{3+} 代 Si^{4+} 不仅使q值降低，又使自由阳离子 Ca^{2+} 、 Na^{1+} 、 K^{1+} 等参加成矿从而增加R值；R值的增加还可由 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 的互代，Na与K的互代，Ca与Na的互代， Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 的互代……一切类质同象的代换。所以，R值的增大过程是表明摩尔原子数或量和摩尔分子数或量的增大过程，由于 $q_0 = R \cdot \mu_0$ ，所以R值增大对晶格能 $q \cdot \mu_0$ 贡献足以补偿q的降低（详见表3）。

以上从矿物晶体构造、化学成分，特别以Si和Al为主导控制元素展开的晶格能 $q \cdot \mu_0$ 论证，本质地深刻地说明表2内生的低晶格能矿物让位于外在的高晶格能矿物，是地表风化条件下存在的普遍规律，是无可置疑的。在这个复杂能量转换过程中，主要元素作用如何呢？现以A.П.维诺格拉多夫（1962）八种化学元素在岩浆岩和沉积岩中的分布量（表4）的能量计算来判别，并依此验证岩浆岩转化为沉积岩所需要的能量值是否正确。

表4 八种元素在岩浆岩和沉积岩变化量分析

元 素	在岩浆岩 中含量%	在沉积岩 中含量%	变 化 分 析		能 量 分 析	
			变化量	变化率%	变化能量 $\times 4.184 \text{KJ}$	变化率 %
Si	29.50	23.80	5.70	31.25	142.50	67.22
Al	8.05	10.45	2.40	13.16	30.72	14.49
Fe	4.65	3.33	$\text{Fe}^{3+} 0.79$	7.23	6.78	5.36
			$\text{Fe}^{2+} 0.53$		4.58	
Mg	1.87	1.34	0.53	2.90	3.13	1.48
Ca	2.96	2.53	0.43	2.36	2.05	0.97
Na	2.50	0.66	1.84	10.09	2.30	1.08
K	2.50	2.28	0.22	1.21	0.22	0.10
O	47.00	52.80	5.80	31.80	19.72	9.30
合		计	18.24	100.00	212.00	100.00

注：1.八种元素在岩浆岩和沉积岩中的含量取据A.П.ВИНОГРАДОВ(1962)；
2.变化能量计算依参考文献〔6〕表1的J.格林值。

在岩浆岩与沉积岩相互转化过程中，即岩浆岩在表生风化条件下吸收太阳能，转化为沉积岩；或沉积岩由于地壳运动沉降到地壳深处，转化为岩浆岩并释放出累积的太阳能过程中，根据表4变化量计算的 能量为 $212 \times 4.184 \text{KJ/mol}$ ，与根据平均沉积岩和平均岩浆岩晶格能之差的 $203.2 \times 4.184 \text{KJ/mol}$ ，仅相差 $8.8 \times 4.184 \text{KJ/mol}$ ，占两者之和平均数的4.24%。因此，变化能量值计算是可信的，两种计算方法是成立的。于是，在能量转换过程中主要元素作用如下：硅承担67.22%，铝承担14.49%，氧承担9.30%，铁、镁、钙、钠、钾等承担8.99%。这些数字非常明显而突出地说明，硅和铝是能量转换的主导控制元素。

最后必须着重指出，在地表条件下矿物岩石破坏的风化过程，是逐渐的、缓慢的、(3.4)；因此沉积岩的蓄能过程，也必然是缓慢的、长期的。在地壳深部，沉积岩的吸热过程是缓慢的接受热量作为“导火线”，继之就迅速的放出大量能量给结晶岩浆岩或变质岩。这就是厚层沉积岩堆积区（如地槽区），常伴随岩浆活动变质作用和构造运动的地球化学能量解释。基于此点，我们认为地壳运动、岩浆活动、变质作用等内力地质作用，除了依靠地球本身的内能以外，也需要宇宙能，主要是太阳能作补给。这样，外能补充内能并通过内能起作用，就构成强大、经久不息的地壳运动，岩浆活动，变质作用，表生作用等改造地球面貌的宏伟景象。

参 考 文 献

- 1 H·J·勒斯勒等，地球化学表。科学出版社，1985
- 2 H·B·别洛夫等，地球化学过程中能量的来源，化学地理的基本理论与方法，科学出版社，1963
- 3 洪庆玉，论岩浆岩风化期长短的地球化学，地质评论，1958；18(2)
- 4 洪庆玉，硅酸盐钾矿物风化的地球化学及其农业应用，土壤学报，1964；12(3)
- 5 洪庆玉，论砂卡岩生成受岩浆岩和碳酸盐控制，中国地质学会第一届矿物岩石地球化学专业学术会议论文选集（岩石版），1964
- 6 洪庆玉，论岩石风化的能量控制及其成矿意义，地球化学，1973；(2)
- 7 洪庆玉，论地球化学能量理论在地球演化上的意义，西南石油学院学报，1990；12(2)

ON TRANSFORMATION OF INTERNAL AND EXTERNAL GEOCHEMICAL ENERGY

Hong Qingyu

Den Tao

(Dept. of Postgraduates) (Dept. of Geological Exploration)

Abstract

Rocks have laws of q-value increase in the earth's surface, in which magmatic and metamorphic rocks absorb universal energy such as the solar energy etc. to change into sedimentary rocks. In the depth of the earth's

crust, sedimentary rocks release the energy and change into magmatic or metamorphic rocks. The energy like this has been transformed through internally formed lower crystal lattice energy's minerals and externally formed higher crystal lattice energy's minerals which are energy's carriers, and transformed by leading control elements like silicon and aluminium, as well as oxygen, sodium, potassium, magnesium and iron etc. The external energy replenishes the internal energy and acts through the internal energy, thus causing the great motion of remaking landforms.

Key Words: Evolution of lithofacies; External energy; Transformation of energy; Geochemistry

“振荡脉冲射流喷嘴技术”通过部级鉴定

由西南石油学院与重庆大学、中原油田共同合作完成的“振荡脉冲射流喷嘴技术”，于8月2～3日在北京通过了由总公司钻井工程局和装备部组织的鉴定。

与会期间，由钻井工程局总工程师李克向等17位同行专家组成的鉴定委员会对该项成果进行了认真评议，认为：“振荡脉冲射流喷嘴”在理论上有所发展，设计先进，结构合理、使用方便。装有该喷嘴的钻头在工业试验中取得明显的效果，已基本具备推广应用的条件。该研究成果整体上已达到国内外先进水平”。

这种装有“振荡脉冲射流喷嘴”的钻头已分别在八个油田进行工业试验，获得了成功。根据中原、塔里木指挥部、江汉、新疆等四个油田使用的57只钻头，133只喷嘴的统计，机械钻速平均提高35.5～77%，单只钻头进尺平均提高6～44%。

该新型喷嘴不仅在浅井、中深井中提高机械钻速与单只钻井进尺，而且在深井中也取得了明显的效果，如塔里木指挥部在3500～5000米的井段试验了21只钻头，机械钻速平均提高35.7%，单只钻头进尺平均提高44%。

邱黎樟供稿