

云南深部热流研究^{*}

周真恒 向才英 覃玉玺 赵晋明

(云南省地震局, 昆明 650204)

摘要 阐述了云南大地热流分布特征, 并从地壳结构入手探讨了地壳、上地幔的生热率垂向分布, 进而研究了云南的深部热流结构. 研究表明, 垂向上, 上地壳所产生的热流量最大, 中地壳次之, 下地壳最小; 横向上, 各构造单元深部热流结构差别较大, 全区地幔热流变化范围是 $19 \sim 57 \text{ mW/m}^2$.

主题词 云南 地震波速度 生热率 深部热流

1 前言

云南地区地震活动频繁而强烈. 据不完全统计, 从 1500 年至 1990 年共发生 7 级以上地震 19 次, 如 1833 年 9 月 6 日嵩明 8 级、1925 年 3 月 16 日大理 7 级、1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级、1976 年 5 月 29 日龙陵 7.3、7.4 级、1988 年 11 月 6 日澜沧-耿马 7.6、7.2 级地震等. 这些地震孕育、发生和发展的根本动力来自地球的内热, 因此, 开展深部热流研究工作是探讨地壳脆韧性转换及壳内多震层孕震、发震机制的基础.

2 云南大地热流分布特征

大地热流是唯一能够在地表测到的直接反映地球深部热状态的物理量, 亦是地热场最重要的表征. 一个有代表意义的区域背景热流值, 不仅能反映区域地壳热状态, 而且对了解地壳演化的地球动力学过程有着重要意义. 在深部热流研究中通常采用具有深部热结构意义并能代表各构造单元或其小区地热状况的背景热流值(通常采用地表热流均值).

我们汇集了云南全区的大地热流测值^[1, 2]和估算值^[3], 并绘制成热流分布图, 见图 1. 由图 1 可见, 云南地热横向变化相当显著, 西部腾冲地块最高, 向东呈起伏降低的趋势. 热流的分布与地质构造单元有明显的一致性.

(1) 腾冲地块: 位于怒江断裂以西, 是喜马拉雅高地热带的组成部分. 区内有多处沸泉、热泉、间隙喷泉、喷气孔、喷气穴和水热爆炸等, 显示该区为高热流区. 腾冲一带热流极大值为 120.5 mW/m^2 , 约为全球均值(61.6 mW/m^2)的两倍. 远离腾冲热异常中心的龙陵镇安和潞西测点, 热流值降至 $73 \sim 77 \text{ mW/m}^2$, 但整个地块热流均值(91 mW/m^2)仍接近全球均值的 1.5 倍.

(2) 保山地块: 位于怒江断裂与北澜沧江-双江断裂之间. 与腾冲地块相比, 热流值低得

^{*} 云南省应用基础研究基金资助项目

收稿日期: 1996-04-30

第一作者简介: 周真恒, 男, 1964 年 6 月生, 助理研究员, 现为在读博士生, 从事岩浆岩、古地磁、地热、地震地质等方面的研究工作.

多.地块北部的保山地区,热流测值为 67 mW/m^2 ^[2],估算值为 69.9 mW/m^2 ;南部的澜沧地区热流值为 $61.3\sim 66.0\text{ mW/m}^2$.

(3) 兰坪-思茅拗陷:位于北澜沧江-双江断裂与红河断裂之间.北部永平地区的永平测点热流值为 70.8 mW/m^2 ,可能由于该测点靠近北澜沧江断裂,受该断裂活动的影响,其热流值较高.南部的普洱地区,虽然其热流估算值较大(77.3 mW/m^2),但从磨黑、普洱至景洪,热流测值从 63.2 mW/m^2 降至 37.7 mW/m^2 ,其热流均值仅为 57.0 mW/m^2 ,属于低热流区.

(4) 盐源-丽江陆缘拗陷:位于红河断裂以北,剑川-丽江断裂与程海断裂之间,属康滇菱形断块的西部区.其南部的位于红河断裂带上的下关测点热流值为 $66.0\sim 103.4\text{ mW/m}^2$ (均值为 85.6 mW/m^2);北部剑川-丽江地区的丽江测点热流值为 55.3 mW/m^2 ,略低于全球均值.但龙蟠-剑川断裂带测点热流值较高($97.1\sim 98.5\text{ mW/m}^2$).全区热流均值为 84.6 mW/m^2 ,是云南仅次于腾冲地块的高地热异常区.

(5) 康滇古隆起:位于元谋绿汁江断裂与小江断裂之间,属康滇菱形断块东部区.区内热流测点集中布设在昆明和峨山地区,热流值为 $67\sim 105\text{ mW/m}^2$,13 个测点的热流均值为 83 mW/m^2 .该区是仅次于盐源-丽江陆缘拗陷的高地热异常区.

(6) 滇中拗陷:位于红河断裂以北,程海断裂与元谋绿汁江断裂之间,属康滇菱形断块内部区.其热流值为 $52.6\sim 82.8\text{ mW/m}^2$,实测热流均值(73.5 mW/m^2)较攀西地区 11 个测点均值($62\pm 19\text{ mW/m}^2$)^[4]略高.与菱形断块东西部两区相比,该区热流要低得多.

(7) 滇东拗褶带:位于弥勒断裂以北,小江断裂以东.区内现无热流测值,仅南部边界区的师宗、坝旺有热流测值,为 $48.3\sim 66.2\text{ mW/m}^2$,东北部昭通地区的热流估算值为 $51.6\sim 63.6\text{ mW/m}^2$.该区属于低热流区.

(8) 右江块隆(滇东南):位于弥勒断裂东南部.区内 13 个热流测值或估算值为 $45\sim 68.8\text{ mW/m}^2$,均值为 56.1 mW/m^2 ,低于全球热流均值.该区属于低热流区.

3 云南地壳和上地幔生热率的垂向分布

进行深部热流研究,难点在于如何合理地确定生热率随深度的垂向分布.我们采用地震波速 v_P 与生热率 A 的相关式^[5~6]

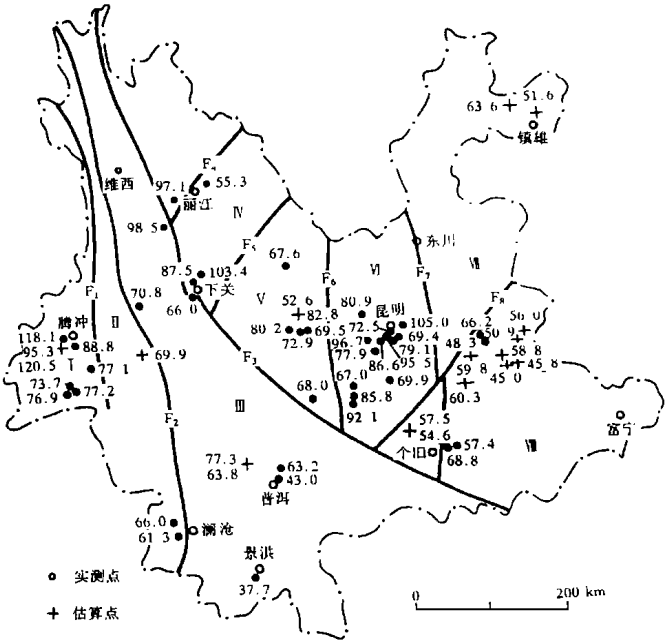


图 1 云南大地热流分布

Fig. 1 Distribution of heat flow in Yunnan area.

- I 腾冲地块; II 保山地块; III 兰坪思茅拗陷;
- IV 盐源丽江陆缘拗陷; V 滇中拗陷; VI 康滇古隆起;
- VII 滇东拗褶带; VIII 右江块隆; F₁ 怒江断裂;
- F₂ 北澜沧江-双江断裂; F₃ 红河断裂; F₄ 剑川-丽江断裂;
- F₅ 程海断裂; F₆ 元谋-绿汁江断裂; F₇ 小江断裂;
- F₈ 弥勒断裂

$$\ln A = 13.7 - 2.17 v_P \quad (1)$$

确定生热率随深度的垂向分布. 在云南相继开展过滇深 82、滇深 86~87 深部地震测深工程, 所获得的地壳结构资料^{①[7]} 是本项研究的基础.

由于(1)式是在 20 °C, 100 MPa 的实验室条件下确定的, 因而必须将地壳、上地幔不同深度的原位波速 v_P 校正到实验室条件下, 方能进行 v_P - A 转换. 对于沉积盖层以下的地壳、上地幔, 我们采用文献[8] 给出的积分形式的校正函数 $C(Z)$

$$v_P(20\text{ }^{\circ}\text{C}, 100\text{ MPa}) = v_P(T, P)[1 + C(Z)/v_P(T, P)] \quad (2)$$

$$C(Z) = \int_T^{20} (\partial v_P / \partial T)_P dT + \int_P^{100} (\partial v_P / \partial P)_T dP \quad (3)$$

进行原位 v_P 的温压校正.

应说明的是, 地壳浅层是地质构造最为复杂、地下水活动最为强烈的地段, 属 v_P - A 非相关层. 因此, 在地壳浅层不能直接应用 v_P - A 关系确定生热率^[9]. 针对云南实际情况, 对沉积盖层的生热率, 均采用文献[2] 的结果, 并根据研究层段的具体需要按地层厚度进行加权处理.

深部地震测深各炮点的速度-深度剖面及转换的生热率结果见图 2 和图 3. 在滇东南地区未作过地震测深工作, 各结构层的生热率均为一些文献给出的结果. 图 2 和图 3 表明, 尽管各炮点地壳的垂向生热率分布存在一定差异, 但均呈现随深度而递减的总趋势. 地壳各结构层生热率均比上地幔顶部生热率($0.01 \sim 0.04 \mu\text{W}/\text{m}^3$)大得多.

4 云南地区深部热流结构

深部热流结构包括壳幔两部分的热流配分比例、地壳各结构层热流构成等内容. 在中国大陆地区地表观测到的热流值中包含着地壳放射性生热贡献和来自深部的地幔热流两部分. 深部的地幔热流是一个更能够反映构造活动性的物理量, 而地壳的放射性热源的分布受到地壳运动的影响, 在一定程度上反映了这个地区所经历的地壳演化历史^[10]. 弄清地壳、上地幔热结构是研究岩石圈构造演化问题的主要方面.

地壳各结构层热流量为该层厚度 H 与其放射性生热率 A 之乘积. 我们采用下式(Lachenbruch et al., 1970)计算地壳各结构层界面热流和地幔热流

$$q_{i+1} = q_i - A_i H_i \quad (4)$$

式中 q_{i+1} , q_i 分别为第 $i+1$ 层和第 i 层的上界面热流, H_i , A_i 分别为第 i 层的厚度和生热率. 沉积盖层的厚度通过综合分析区域地质资料^[11] 确定(表 1), 部分厚度资料引自文献[2]. 二叠系-奥陶系也并为一个层处理. 各构造单元地壳地质模型(表 2)采用文献[7] 和胡鸿翔等(1989)^① 的深部地震测深分析结果.

各炮点揭示的相应构造单元地壳各结构层的界面热流和地幔热流展示于图 2 和图 3 中, 综合结果见表 3. 从表 3 的计算结果可得到如下认识:

(1) 不论哪一构造单元, 上地壳所产生的热流量 q_{uc} 最大, 中地壳 q_{mc} 次之, 下地壳 q_{lc} 最小, 这反映了地壳热结构(放射性热源分布)垂向上的差异.

(2) 各构造单元 q_{uc} , q_{mc} 和 q_{lc} 数值的差异反映了地壳各结构层热流结构横向上的变化特征.

(3) 云南地壳热流 q_c 为 $30 \sim 47 \text{ mW}/\text{m}^2$, 其中隶属于扬子准地台的各构造单元(包括盐源

① 国家地震局深地震测深技术协调小组. 滇西地震预报实验场深地震测深 86~87 工程资料处理总结报告. 1989.

-丽江陆缘拗陷、滇中拗陷、康滇古隆起和滇东拗褶带)地壳热流较大, $q_c > 35 \text{ mW/m}^2$. 其它单元热流较低, $q_c = 30 \sim 35 \text{ mW/m}^2$.

(4) 深部地幔热流 q_m 是一个更能够反映构造活动性的物理量. 云南全区地幔热流起伏很大, 变化范围是 $19 \sim 57 \text{ mW/m}^2$. q_m 的变化反映了云南深部热结构分为 3 种基本类型:

$q_m > 38 \text{ mW/m}^2$ 的有 3 个构造单元: 腾冲地块的 q_m 是云南全区最高值, 56.4 mW/m^2 ; 盐源-丽江陆缘拗陷次之, $q_m = 43.3 \sim 48.6 \text{ mW/m}^2$; 康滇古隆起稍小, $q_m = 38.2 \sim 40.4 \text{ mW/m}^2$. 上述 q_m 值的大小实际上反映了这 3 个高地热异常区新构造运动的强烈程度. 腾冲地

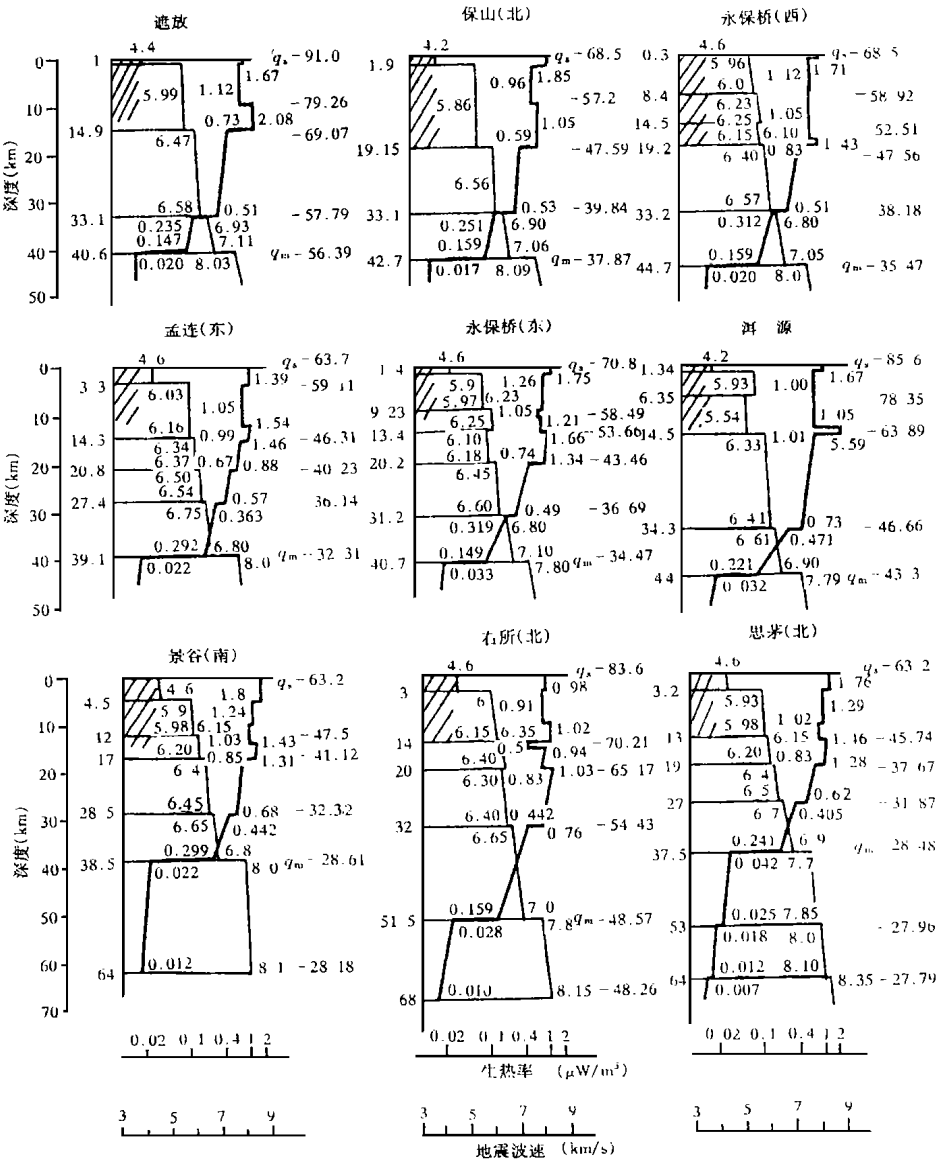


图 2 地震波速-深度剖面 and 换算的生热率、深部热流-深度剖面
(阴影区代表沉积盖层)

Fig. 2 Seismic wave velocity-depth profiles and converted heat production, deep heat flow-depth profiles.

块构造活动最强烈, 盐源-丽江陆缘拗陷次之, 康滇古隆起稍弱. 在3个构造单元内新的(或继承性)断裂活动水平很高, 地震活动频繁而强烈, 由于腾冲地区有近代火山活动和现代深部岩浆活动, 剑川附近及鹤庆松桂亦有近代岩浆活动, 所以这两个地区的 q_m 比康滇古隆起高. 因此, $q_m > 38 \text{ mW/m}^2$ 是典型的构造活动区的热结构特征.

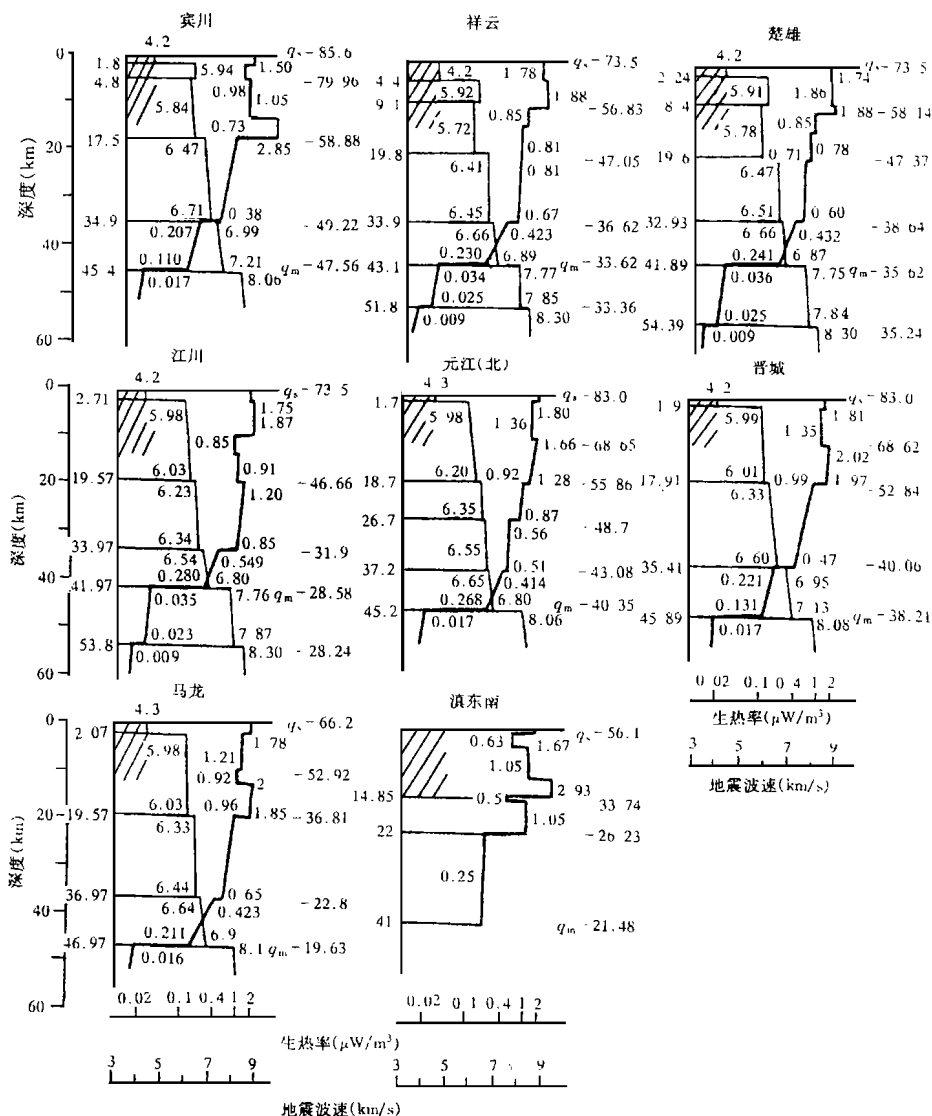


图3 地震波速-深度剖面 and 换算的生热率、深部热流-深度剖面
(阴影区代表沉积盖层)

Fig. 3 Seismic wave velocity-depth profiles and converted heat production, deep heat flow-depth profiles.

q_m , q_m/q_s 为低值, 代表稳定区热结构特征 (q_s 代表地表热流). 属于此种类型的区域包括滇东拗褶带和右江块隆. 这2个构造单元地幔热流是云南全区最低值, 为 $19.6 \sim 21.5 \text{ mW/m}^2$, 甚至低于全球大陆地区地幔热流均值 28 mW/m^2 (Pollack 和 Chapman, 1977).

q_m 介于上述两种类型之间, 显示了中间过渡型地区的热结构特征. 保山地块、兰坪-思茅拗陷和滇中拗陷属此类型, 其地幔热流值接近全球大陆地区均值且略高.

(5)保山地块、兰坪-思茅拗陷两个单元北部(保山(N)和永保桥(W)炮点所反映的保山地

表 1 各构造单元沉积盖层厚度(km)

地层	腾冲 地块	保山地块		兰坪-思茅拗陷		盐源-丽江陆缘拗陷		滇中	康滇	滇东	右江块隆
		保山地区	澜沧地区	永平地区	思茅普地区	下关洱源地区	剑川丽江地区	拗陷	古隆起	拗褶带	(滇东南)
Kz	2.0	0.25	0.6	0.2	1.2	1.5	1.0	0.4	0.5	1.0	0.5
K	+	—	0.5	1.9	1.0	—	—	2.8	0.3	—	—
J	+	2.0	1.0	2.4	5.0	—	—	7.5	2.0	1.2	—
T	+	2.5	1.0	2.0	3.0	0.8	4.3	3.2	1.5	1.3	3.0
P—O	8.0	8.4	8.45	4.0	3.3	10.9	8.5	—	4.1	5.6	6.6
Є	1.55	6.0	+	—	—	—	—	—	1.3	1.3	4.25
Z	1.0	+	+	—	—	—	0.9	—	1.3	1.9	0.5

— 地层缺失; — — 地层未出露(中生界覆盖); + 地层仅局部出露

表 2 各炮点所反映的相应构造单元地壳地质模型(界面深度单位: km)

界面	腾冲地块	保山地块			兰坪思茅拗陷			盐源丽江陆缘拗陷			滇中拗陷			康滇古隆起 滇东拗褶带			右江 块隆
	遮放	保山 (N)	永保桥 (W)	孟连 (E)	永保桥 (E)	思茅 (N)	景谷 (S)	宾川	洱源	右所 (N)	祥云	楚雄	江川	元江 (N)	晋城	马龙	
沉积盖层底	12.55	19.15	19.15	11.55	10.5	13.5	13.5	13.2	13.2	14.7	13.9	13.9	13.9	11.0	11.0	12.3	14.85
上地壳底	14.9	19.15	19.2	14.3	20.2	19.0	17.0	17.5	14.5	20.0	19.8	19.6	19.57	18.7	17.91	19.57	22.0
中地壳底	33.1	33.1	33.2	20.8	31.2	27.0	28.5	34.9	34.3	32.0	33.9	32.93	33.97	37.2	35.41	36.97	
下地壳底	40.6	42.7	44.7	39.1	40.7	37.5	38.5	45.4	44.0	51.5	43.1	41.89	41.97	45.2	45.91	46.97	41.0

表 3 各炮点所反映的相应构造单元地表热流(q_s)、地壳热流(q_c)和地幔热流(q_m)组成关系

地热参数	腾冲地块	保山地块			兰坪思茅拗陷			盐源丽江陆缘拗陷			滇中拗陷			康滇古隆起		
	遮放	保山 (N)	(W)	(E)	(E)	(N)	(S)	(N)			(N)			(N)	()	
	73.7~ 120.5	67~ 69.9	67~ 69.9	61.3~ 66	70.8	63.2	63.2	66~ 103.4	66~ 103.4	55.3~ 98.5	67.6~ 82.8	67.6~ 82.8	67.6~ 82.8	67~ 105	67~ 105	66.2 68.8
热流均值 q_s	91.0	68.5	68.5	63.7	70.8	63.2	63.2	85.6	85.6	83.6	73.5	73.5	73.5	83	83	66.2
()	(8)	(2)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(3)	(3)	(3)	(6)	(6)	(6)	(13)	(13)	(1) (13)
q_{uc}	21.93	20.91	20.94	17.39	27.34	25.53	22.08	26.72	21.71	18.43	26.45	26.13	26.84	27.14	30.16	29.39
中地壳 q_{mc}	11.28	7.75	9.38	6.08	6.77	5.80	8.80	9.66	17.23	10.74	10.43	8.73	14.76	12.78	12.78	14.01
下地壳 q_{lc}	1.40	1.97	2.71	7.92	2.22	3.39	3.71	1.66	3.36	5.86	3.00	3.02	3.32	2.73	1.85	3.17
整个地壳 q_c	34.61	30.63	33.03	31.39	36.33	34.72	34.59	38.04	42.30	35.03	39.88	37.88	44.92	42.65	44.79	46.57
地幔 q_m	56.39	37.87	35.47	32.31	34.47	28.48	28.61	47.56	43.30	48.57	33.62	35.62	28.58	40.35	38.21	19.63
$q_c/q_s(\%)$	38.0	44.7	48.2	49.3	51.3	54.9	54.7	44.4	49.4	41.9	54.3	51.5	61.1	51.4	54.0	70.3
$q_m/q_s(\%)$	62.0	55.3	51.8	50.7	48.7	45.1	45.3	55.6	50.6	58.1	45.7	48.5	38.9	48.6	46.0	29.7
q_m/q_c	1.63	1.24	1.07	1.03	0.95	0.82	0.83	1.25	1.02	1.39	0.84	0.94	0.64	0.95	0.85	0.42

; mW/m^2 ; q_{uc} 、 q_{mc} 和 q_{lc} 分别为上地壳()、

、(E)) ((E) 、(N)
(S)) , , , .

