

1980~1993 年我国“地热涡”的 若干统计特征*

—— II. “地热涡”与地震的统计相关

汤懋苍 · 高晓清

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

摘要 利用文献[1]的结果, 进一步分析了“地热涡”与地震的关系. 结果表明: 凡水平尺度愈大或持续时间愈长的地热涡, 发生的地震亦强, 凡是“弱地热涡”, 即使出现地震其震级亦弱; 14 a 来我国强震 (东部 >5.5 级, 西部 >6.5 级) 集中出现在地热涡半径比 $r/R=0.32\sim0.61$ 的范围内, 另在半径比为 $0.73\sim0.79$ 之间有一强震集中区, $r/R>0.80$ 之后, 无强震出现; 凡处在地壳垂直形变的上升中心区的地热涡, 其地震方位角均在北或东方, 只有贵州地热涡例外; 凡处在地壳下降中心的地热涡, 它们的地震出现在涡中心的东南~西方, 只有汾渭河谷例外; 发震时间与地热涡开始时间 ($T_{3.2}'$ 开始 $\geq 0.5^\circ\text{C}$ 的时间) 之差值与地震震级呈正相关. 在文献[1]与本文事实分析的基础上, 作者初步提出了一个地气耦合的概念模式图.

关键词 地热涡 地震 地气耦合概念模式

文献[1]分析了“地热涡”的时空分布特征, 本文将分析“地热涡”与地震的关系, 其结果对了解“地热涡”的本质大为有益.

1 “地热涡”时空尺度与地震强度

如前文^[1]的图 1 所示, 如果将暖地温区外围的低地温轴线所包围的区域统称为地热涡的范围, 则 14 a 来所有 $M_s>5$ 级的板内强地震均出现在地热涡区内, 95% 以上的中等地震 (4~5 级) 也出现在地热涡范围内. 将单个地热涡生命史中最强一次地震的震级填在图 1 上 (板缘地震^[2]不计), 图中纵坐标是地热涡维持时间 (季数), 横坐标是地热涡的最大水平尺度 (定义见文献[1]), 对我国西半部 (105°E 以西) 只填 5 级以上地震; 东半部 (105°E 以东) 只填 4 级以上地震, 小于 4 级者按无震统计. 在图 1 上可以划出两条直线, 将图上的点子分成基本相等的 3 部分, 每一部分对应的地震震级和次数列于表 1.

由图 1 和表 1 可以得到以下几点: (1) 3 次大于 7 级的板内地震与其对应的地热涡的水平尺度均大于 700 km; (2) 所有 12 次 6 级以上地震, 其地热涡均大于 650 km; (3) 17 次“无震地

1994-08-09 收稿, 1995-05-05 收修改稿

* 国家攀登计划和中国科学院资助项目

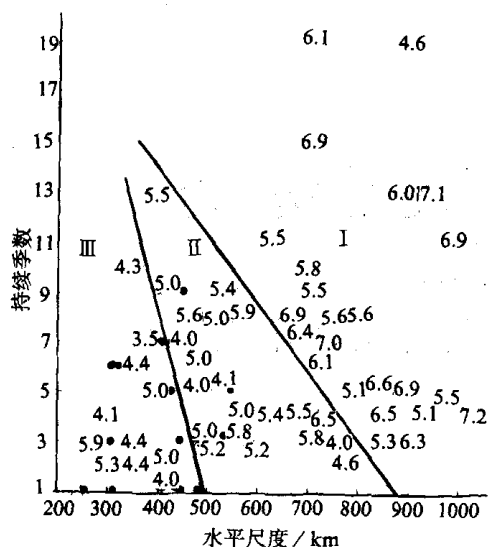


图1 “地热涡”水平尺度、持续时间与其地震强度的点聚图

表1 图1上各区地震震级的出现次数

震级	≥ 7.0	$6.0 \sim 6.9$	$5.0 \sim 5.9$	$4.0 \sim 4.9$	无	合计
I 区	3	11	9	1	0	24
II 区	0	1	15	5	3	24
III 区	0	0	4	6	14	24

热涡”中有 14 次的水平尺度小于 450 km, 另两次虽然大于 450 km, 但持续季数仅 1~2 季, 所以地热涡水平尺度小或维持时间短者, 可能无地震; (4) 水平尺度小于 500 km, 同时维持仅 1~2 个季度的地热涡, 共出现 13 次, 其中 9 次为“无震地热涡”, 另外 4 次的最大震级仅为 5.3 级。由此可见: 凡水平尺度愈大或持续时间愈长的地热涡(可称它们为“强地热涡”), 发生的地震亦强; 凡是“弱地热涡”即使出现地震其震级亦弱。

2 地震出现地点与“地热涡”的关系

根据地热涡外围的闭合低温轴线, 可以定出每个“地热涡”的几何中心。从地热涡中心到低温轴线上任一点的距离记为 R , 设地热涡中心至地震震中的距离为 r , 则对每一次地震可得到一个 r/R 值, 称它为“半径比”。14a 来我国东半部大陆共出现 $M_s \geq 4.0$ 级地震 136 次; 我国西半部共出现 $M_s \geq 5.0$ 级的板内地震 148 次(板内地震与板缘地震的分界线, 参见文献 [2])。将该 284 次地震的“半径比”按面积相等的原则分成 4 群, 即以 r/R 分别等于 $1/2$, $\sqrt{2}/2$ 和 $\sqrt{3}/2$ 为界, 统计它们的出现频数, 结果见表 2 和表 3。为了突出其特征, 将地热涡内部和

表2 我国东半部 1980~1993 年 $M_s \geq 4.0$ 级地震的“半径比”统计

区域名称 r/R	热涡中心 $0 \sim 0.28$	热涡内部 $0.29 \sim 0.50$	热涡边缘 $0.51 \sim 0.70$	冷区边缘 $0.71 \sim 0.86$	冷区内部 $0.87 \sim 0.94$	冷区中心 $0.95 \sim 1.0$	合计
地 4.0~4.5	0	16	29	29	7	0	81
震 4.6~5.0	0	8	3	10	0	0	21
震 5.1~5.5	0	9	8	8	0	0	25
级 >5.5	0	2	5	2	0	0	9
合 计	0	35	45	49	7	0	136
最大震级		6.2	6.1	5.9	4.1		6.2

表3 我国西半部 1980~1993 年 $M_s \geq 5.0$ 级地震的“半径比”统计

区域名称 r/R	热涡中心 $0 \sim 0.28$	热涡内部 $0.29 \sim 0.50$	热涡边缘 $0.51 \sim 0.70$	冷区边缘 $0.71 \sim 0.86$	冷区内部 $0.87 \sim 0.94$	冷区中心 $0.95 \sim 1.0$	合计
地 5.0~5.5	0	21	28	34	16	0	99
震 5.6~5.9	0	5	7	5	3	0	20
震 5.6~6.5	0	7	7	3	1	0	18
级 >6.5	0	6	4	1	0	0	11
合 计	0	39	46	43	20	0	148
最大震级		7.3	7.0	6.6	6.0		7.3

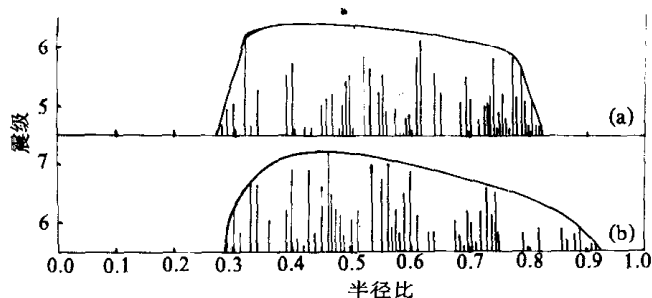


图2 中强地震沿地热涡“半径比”的分布

(a) 东半部 $M_s > 4.5$ 级, (b) 西半部 $M_s > 5.5$ 级

冷区内部再各细分出地热涡中心和冷区中心两档.从表中可以得到一些有意思的事实:

(1)地震出现在半径比为 0.29~0.94 的范围内,在地热涡中心 ($r/R \leq 0.28$, 约占全部面积的 8%) 和冷区中心 ($r/R \geq 0.95$, 约占全部面积的 10%) 从未出现过中等以上地震.这一统计结果在实用上可预报地震安全区(无震区),

其前提条件是高地温中心的位置可精确定出(这就要求地温测站足够密);在理论上它支持松泽武雄^[3]的“热震”观点.

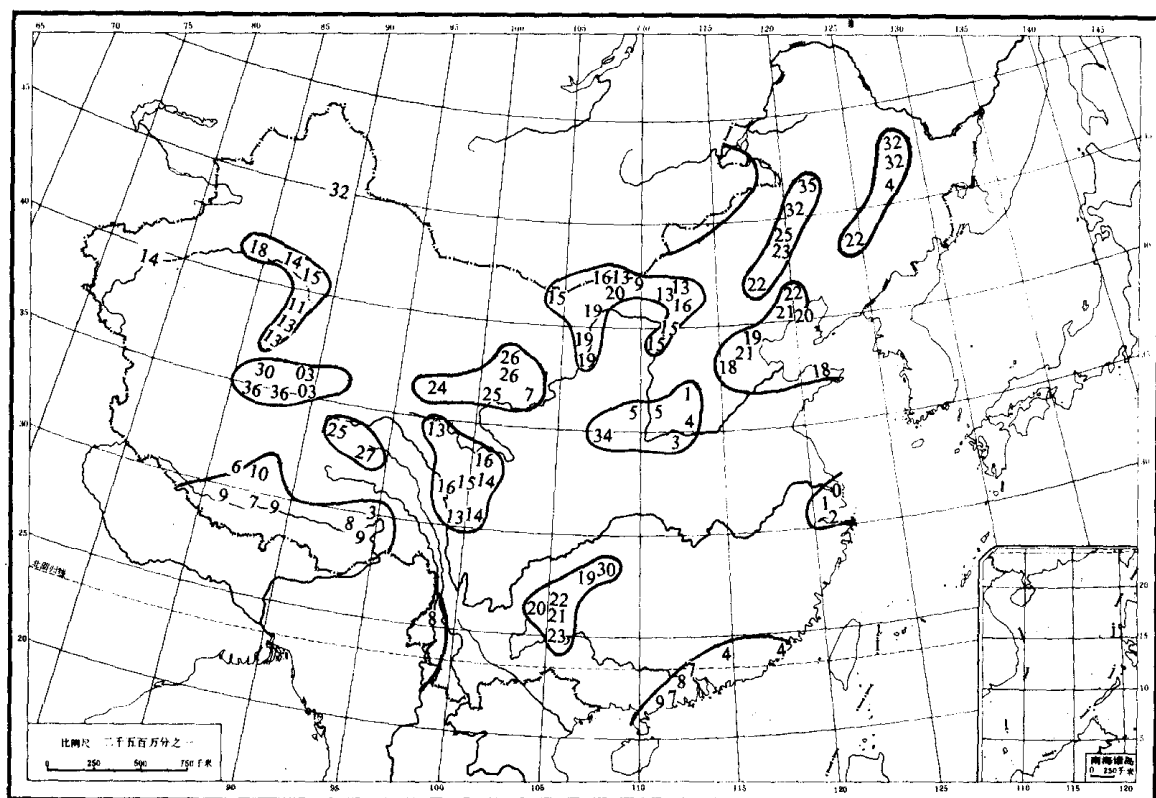
(2)中等地震(表2和表3中的第一档)以冷区边缘出现最多,占 $63/180 \approx 35\%$,但最强地震(表2和表3中第4档)则以暖区 ($r/R = 0.29 \sim 0.70$) 为最多,占 $17/20 = 85\%$,这表明“地热涡”动力结构的不对称性.特别是若将表2和表3中“地热涡内部”与“冷区内部”的地震作一对照,此种不对称性更为明显.这使人想起台风的风速结构:台风中心为静风区(台风眼),往外(相当于地热涡内部)风速猛烈增加,是整个台风中风速水平切变最大的区域,再往外(相当于地热涡边缘)水平风速达到最大,以后逐渐减弱.如果“地热涡”深部的运动速度结构与台风相似,则表2和表3所示的不对称结构似可得到解释.

图2所示为14a来我国中强地震(东部 > 4.5 级,西部 > 5.5 级)沿地热涡半径比的分布,可见强震(东部 > 5.5 级,西部 > 6.5 级)集中出现在 $r/R = 0.32 \sim 0.61$ 的范围内,另在半径比为 0.73~0.79 之间有一强震集中区, $r/R > 0.80$ 以后,无强震出现.这一统计结果对预报强震发生的地点无疑会有帮助.从图2可见,在 r/R 为 0.62~0.72 之间为一强震空缺区,这可能是统计年代太短,而出现的偶然现象,也可能有某种必然原因存在,若果真如此,则值得深入研究.

图2所示我国强震出现的范围约占“地热涡”全部面积的 52%,就地震预报而言,此范围仍太大.我们力图缩小地震落点的限定范围.为此作者做了一个有意思的统计工作,统计方法如下:在逐季的 T'_{32} 图上,填上该季发生的所有中强地震的震中位置,每一个地震必定位于一个地热涡的范围内,将此地震震中相对于该地热涡中心的方位角,以 10° 为单位,填在涡中心的位置上,少数地热涡在同一个季度出现了两次(或更多)中强地震,只填其中最强烈地震的方位角,这就得到了图3.从图3可以看到一重要事实:同一地域地热涡中的强地震,其方位角非常相近,如华南沿海地热涡的地震都出现在方位角为 $40^\circ \sim 90^\circ$ (东北~东)的范围内;河套地热涡的地震均出现在 $130^\circ \sim 200^\circ$ (东南~南偏西)的方位角内,等等.

将图3与文献[1]中的图2、图3对照,可以发现:凡地壳上升中心区的地热涡,如喜马拉雅、西昆仑山、滇西高原、苏南-浙北等,其地震方位角均在北或东方,只有贵州地热涡例外,它的地震出现在西南方 ($190^\circ \sim 230^\circ$);凡地壳下降中心的地热涡,如塔里木东部、祁连山东段、川西青南、河套北端及华北大部,它们的地震出现在东南~西方,只有汾渭河谷的地热涡例外,其地震出现在北~东北方 ($340^\circ \sim 350^\circ$).

如果图3的结果对未来的地震亦有代表性,则它对地震落点的预报将大有帮助.

图 3 各地热涡的强震震中方位角分布图 (单位: 10°)

3 地震发震时间与“地热涡”的关系

根据前两节的统计结果, 当一个“地热涡”出现后, 人们可以从它的水平尺度、维持时间和涡中心点, 大致确定与该“地热涡”相应的板内地震的最强震级和震中地点. 那么地震预报三要素中另一要素——发震时间与“地热涡”有什么关系? 这是本节所要探讨的.

1980~1993 年的 72 次“地热涡”过程有 55 次伴随着中强地震 (见表 1). 统计该 55 次过程中每次最强地震的发生时间 (表 4), 表中的“发震时间比”是指发震时间 (以“地热涡”开始出现为起始时间), 与该地热涡整个生命史的持续时间之比.

表 4 地热涡最强地震的发震时间统计

发震时间比	0	0.04~0.1	0.11~0.2	0.21~0.3	0.31~0.4	0.41~0.5	0.62	1.0	合计
次 数	15	7	8	8	7	8	1	1	55

由表 4 可见: (1) 有 15 次 (占总数的 27%) 地震与地热涡同时出现 (发震时间比为零), 这意味着最强地震发生时, 在地热涡中尚无一站 $T'_{3.2}$ 达到 0.5°C . (在文献[1] 关于“地热涡”的定义中有一条是: 凡有 4.0 级以上地震出现者, 只要求 $T'_{3.2} > 0^\circ\text{C}$, 即视为“地热涡”开始) 这 15 次中有 10 次是出现在西半部; (2) 96% 的个例 (53 次) 的最强地震出现在地热涡生命史的前半段 (发震时间比 $\leq 50\%$), 这似乎表明, 一次地震的“孕震时间”, 不像以前人们所认为的需要几年至几十年, 而只需 1~2 a (地热涡生命史的一半) 即可, 至少对我国的板内地震是如此; (3) 有两次最强地震出现在地热涡生命史的后半, 一次是 1983 年 10 月蒙古国东端 7.0 级地

震,它是中、蒙两个“地热涡”合并的结果,若只按中国这个地热涡算,则该年3月辽东半岛4.4级为最强地震,它的发震时间比为0.33;另一次是1988年11月北部湾5.0级地震,距该地震最近的地温测站——广西北海,1987年3月 $T'_{3.2}$ 猛升至 1.4°C (两个月距平升温 1.3°C),8月升至 1.8°C ,1988年4月又一极高值达 1.5°C ,均未发生地震,以后 $T'_{3.2}$ 降至负距平,才发生地震(故发震时间比定为1.0),这是非常特殊的例外,一个可能的解释是,北海站陆地浅层的地温,不能代表北部湾水下地壳的地温。

地震的发震时间与“地热涡”的关系更为人们所关心。作者分析了14a来我国东半部所有37次5级以上地震(包括5.0级)的发震时间,除2次在中、蒙边界的蒙古一侧,3次在海上外,其余32次强震中有27次是发生在“地热涡”出现之后,这似乎给强震的发震时间预报带来了希望,其余5次发生在地热涡中心 $T'_{3.2} < 0.5^{\circ}\text{C}$ 之时,如1980年2月博克图(5.6级)、1982年10月百色(5.8级)、1989年11月重庆(5.2级)等,我们认为地温测站太稀,亦是使得上述地震发生时,地热涡中心 $T'_{3.2}$ 未达到 0.5°C 的原因之一,特别是1984年11月银川5.2级地震,其地热涡位于 105°E 以西,测站更少。

在上述27次强震的每一个地热涡中心区,都可找到一代表测站,将地震发生前后数月该站的 $T'_{3.2}$ 变化点成曲线(图略),可以发现一有意义的事实:发震时间与地热涡开始时间($T'_{3.2}$ 开始 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ 的时间)之差值(Δt ,以月为单位)与地震震级呈正相关,如图4(a)所示。图中有3次个例未列入,它们都是地热涡开始形成后, $T'_{3.2}$ 总在 $0.5 \sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 之间缓慢变动,且时间超过了7个月尚未发震,如1990年8月在北京附近有地热涡形成,以后一直到1991年3月 $T'_{3.2}$ 均在 $0.5 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 之间变动,拖到1991年5月地震才在天津附近发生(5.1级)。由图4(a)上的24个震例,可以得到回归方程

$$\Delta t(\text{月}) = 1.8 + 3.1(M_s(\text{级}) - 5), \quad (1)$$

其相关系数为0.62,远超过0.01的置信度。

我国西部因为地温测站更少,在强震的地热涡中心区要找到 $T'_{3.2} \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ 的测站更为困难。在这14a中我们仅找到了7次震例,其中如1990年4月青海共和7.0级大震,其地热涡中心

在门源附近,门源站于1989年9月开始 $T'_{3.2} > 0.5^{\circ}\text{C}$,以后一直持续 $> 0.5^{\circ}\text{C}$,至地震爆发($\Delta t = 8$ 个月)。仿照图4(a),可绘出图4(b)。由图可见7次震例中有6次 $M_s \geq 6.5$ 级,从表3可知14a来,我国西半部 $M_s > 6.5$ 级者共有11次,图4(b)只占其中一半略多。由图4(b)亦可得到回归方程如下:

$$\Delta t(\text{月}) = 5.0 + 1.7(M_s - 6), \quad (6)$$

其相关系数为0.19,查表可得,此方程通不过 $\alpha = 0.10$ 的统计检验。

4 一个我国东半部地震预报的初步方案

通过前面的分析,可以认为在原则上找到了一套利用月(或季)平均 $T'_{3.2}$ 分布图,预报我国东半部强震(≥ 5 级)三要素的中期预报方法,其步骤如下:

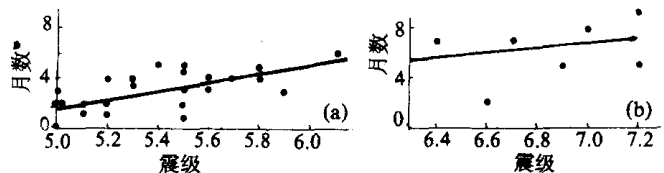


图4 强震的发震时间与震级的相关
(a)东半部 $M_s \geq 5.0$ 级, (b)西半部 $M_s \geq 6.5$ 级

(1)在月平均的 $T'_{3.2}$ 图上,当开始出现 $T'_{3.2} \geq 0.5^\circ\text{C}$ 的地热涡中心,则将该月作为预报地震的“起报时刻”(若在此时刻之前强震已经发生,则将形成“漏报”,不过按过去 14 a 的统计,东半部地区 >5 级强震的漏报率仅为 $5/32 \approx 16\%$);

(2)“起报时刻”出现后,即按文献[1]的规定量出“地热涡”的水平尺度(L),将其点绘在图 1 上,以估计此地热涡范围内可能出现的最大震级,若 $L > 500 \text{ km}$,即可认为最大震级将大于 5 级(当 $L = 400 \sim 500 \text{ km}$ 时,即应引起警惕,但此时若发出预报,则空报太多), L 越大,震级越大.对少数 $T'_{3.2}$ 升高很快的地热涡($\Delta T'_{3.2} > 1.0^\circ\text{C}/2$ 个月),即使 L 较小,亦应估计为震级较大.

(3)根据“地热涡”中心的出现地域,在图 3 上可以定出未来发震地点的方位角,具体发震地点在地热涡半径比为 $0.3 \sim 0.8$ 的区间内;

(4)“起报时刻”确定后,根据所预计的震级,可用(1)式预计发震时间,震级愈大、发震时间愈晚.但若超过半年尚未发震,且地热涡中心的 $T'_{3.2}$ 仅略高于 0.5°C ,则震级将减小至 5 级左右.

对我国西半部尚未找到预报发震时刻的指标,(2)式不能作为预报指标,因它未通过统计检验,看来只有待西部地温测站大为加密后,再来找预报指标.

以上预报方案只是根据过去 14 a 资料初步总结出来的,尚未经过实践的考验.

5 关于地(地壳、上地幔)气耦合的概念模式

“地热涡”与季降水距平分布的关系,我们已经做过一些研究^[4],而且用它进行汛期降水预报的实践已逾 20 a,其基本点是:当地热涡处在发展阶段且水平尺度大于某临界尺度时,该地热涡区将多雨.进一步的研究工作正在进行.

根据文献[1]和本文关于“地热涡”与地震关系的基本统计事实,以及“地热涡”与地凸凹的关系^[5],我们可以初步画出一个地气耦合的概念模式图,如图 5 所示,在上地幔软流圈中存在着一种大体自西向东传播的垂直波动(暂称此为“地幔波”),其传播速度在 $200 \sim 500 \text{ km/a}$ 之间,在“地幔波”的上升区(波峰区),对地壳形成顶托,使地壳中的“热液”(岩浆、热水、气等)被迫沿裂隙上涌,形成地球呼气,地壳表层上凸,同时增温,于是给大气以额外的热量,促使降水增多;在地幔波的下沉区(波谷区)过程相反,使地壳下沉,地球吸气、地温降低、降水减少.强地震则出现在上升支与下沉支的接合部,水平切应力最大的地区.图 5 所绘也是作者提出的短期气候变化“地心说”^[6]的基本内容.因为地幔波尚未被直接观测到,故图 5 还只能认为是一个假说.

若深究图 5,它至少存在两个较大的问题.第一个是地幔波的上升支在地壳表层表现为高地温,其机理是什么?如果仅靠分子热传导是无法解释的.目前提出了两种可能机制:一是 Grigori 提出的地球发电机的电晕放电效应^[7];一是郭增建提出的地球呼吸说^[8].作者更倾向于地球呼吸说.但关于“地球呼吸”的原因,郭增建认为是地壳中裂隙的张合^[8],而作者认为是地幔波对地壳的顶托和抽吸作用.

欲使地幔对流对地壳的顶托和抽吸作用足够大,其关键是地幔波的垂直振幅有多大?或者说软流圈中“幔汁”的运动速度有多大?这是第二个大问题.如果幔汁的运动速度仅是 10^0 m/a 的量级,则引起的地球呼吸作用将很微弱,不足以引发短期气候变化,而且由它施加给岩石圈

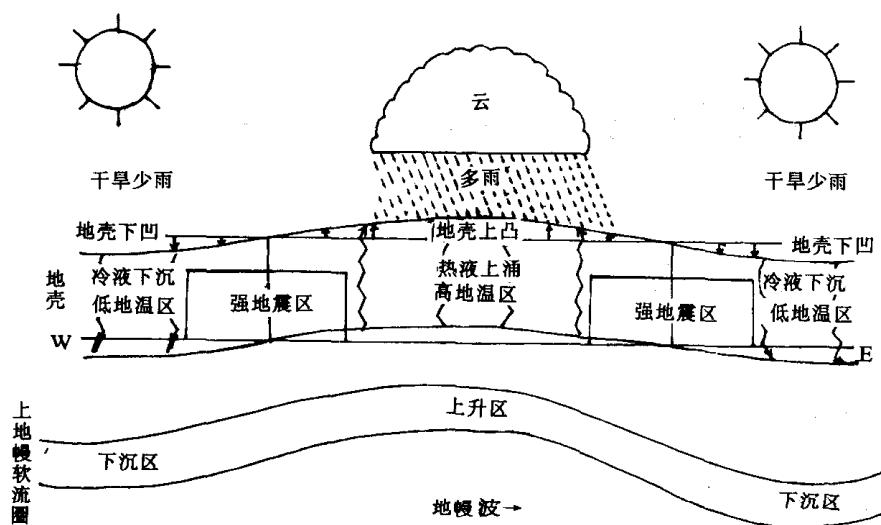


图5 地幔波制约地壳和大气层变化的示意图

的剪切应力也不足以引发地震。如果“幔汁”的瞬时速度与“地幔波”的传播速度为同量级 (1 cm/s), 则很多观测事实均可得到圆满解释。不过这就要求“幔汁”的粘滞系数, 比目前所普遍认为的 (约为 10^{21} Pa·S) 要小几个量级, 这需要新的证据。

参 考 文 献

- 1 1980~1993年我国“地热涡”的若干统计特征——I. “地热涡”的时空分布. 中国科学, 1995, 25(11): 1186~1192
- 2 汤懋苍, 高晓清, 张 建. 中国西部地震与水旱的地域关系. 科学通报, 1995, 40(19): 1795~1798
- 3 松泽武雄. 地震の場の论. 东京大学地震研究所汇报, 1953. 179~202
- 4 汤懋苍, 张 建. 季平均3.2m地温距平场在汛期预报中的应用. 高原气象, 1994, 13(2): 178~187
- 5 汤懋苍, 张 建. 天阴地阳互补说——一种天地对立统一观. 见: 现今地球动力学论文集. 北京: 地震出版社, 1994. 169~180
- 6 汤懋苍, 高晓清. 气候变化的“地心说”. 地球科学进展, 1995, 10(1): 47~56
- 7 董文杰, 汤懋苍, 惠小英. 日地关系研究中的一种新观点介绍. 地球科学进展, 1994, 9(4): 84~90
- 8 郭增建, 秦保燕. 巨大震、旱、洪灾害的综合讨论. 见: 中国科协学会工作部编, 中国减轻自然灾害研究. 北京: 气象出版社, 1992. 23~28