

# 地壳中气体运动的大尺度特征<sup>①</sup>

高晓清<sup>1</sup>, 杨丽薇<sup>1</sup>, 郭维栋<sup>2</sup>, 郭安宁<sup>3</sup>, 郭增建<sup>3</sup>, 汤懋苍<sup>1</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院/中国科学院陆面过程与气候变化重点实验室,甘肃 兰州 730000;

2.南京大学大气科学学院,江苏 南京 210093;3.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**地壳内流体的运动与地球动力学、地震、地球排气及气候变化等密切相关。本文利用我国 239 个气象站 0~3.2 m 地温资料,用 3 种方法计算了地气界面的年平均热通量,发现 30°N 以南的低纬地区表现为地热的净积累,30°N 以北的中高纬地区为地热净放散,其量值达到 2 W/m<sup>2</sup>,表明在岩石圈中有热量从低纬输向高纬,形成地气环流。岩石圈裂隙中地下流体(地气)的运行速度要达到 10~30 cm/s 才可完成热量的纬向输送。本文统计了 2003—2007 年中国大陆地热涡的逐月移动速度,发现以 300~600 km/月(10~20 cm/s)为最多。

**关键词:**地热通量;纬度变化;地下风速;地气环流;地下三圈环流

中图分类号: P434.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)增刊 2-0356-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0356

## Characteristics of Large-scale Gas Motion in the Earth's Crust

GAO Xiao-qing<sup>1</sup>, YANG Li-wei<sup>1</sup>, GUO Wei-dong<sup>2</sup>,

GUO An-ning<sup>3</sup>, GUO Zeng-jian<sup>3</sup>, TANG Mao-cang<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS/Key Laboratory of Land Surface Process and

Climate Change in Cold and Arid Regions, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** At present, it is still known less about the large-scale motion characteristics of fluid in the Earth's crust. The motion characteristics of fluid in the Earth's crust are close related to the geo-dynamics, earthquake, earth's degassing and climate change etc. In this paper, by using the multi-year observation data of soil temperature for different layers at 239 meteorological stations in China, we calculate the annual averaged heat flux over the interface between land and atmosphere with 3 methods and find that it has an opposite annual variation with latitude, a net heat absorption in the south area of 30°N and a net heat emission in the north with a flux of 2 W m<sup>-2</sup>, which demonstrates the heat flows transfer from low to high latitude in the lithosphere with causing an underground circulation as that in the atmosphere. Assuming that the porosity in the surface of lithosphere ( $z=0$ ) is  $10^{-1}$  and  $10^{-5}$  in the bottom, 10~30 cm/s speed is needed for underground fluid (gases in earth) to supply a meridional heat transfer. The statistic for the monthly moving rate of the geothermal vortex in the period of 2003 to 2007 is made in China. The results show that the 300~600 km rate of one month is the most common, the seismic vortex with  $M_s \geq 7.0$  can move backwards and the one with  $M_s = 6.9$  can be taken as a "static vortex" with a 350

① 收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(40975049)

作者简介: 高晓清(1966—), 男, 研究员, 博士生导师。长期从事地气相互作用研究, 近年来重点探讨地球系统和短期气候预测问题。

E-mail: xqgao@lzb.ac.cn.

km distance of farthest precursor that is recognized as a semi-wave-length of the seismic vortex. Therefore, we can evaluate a mean speed of 20 cm/s for the underground gases with Rossby formula. So we can conclude that the underground circulation is also a three-cell circulation.

**Key words:** geothermal flux; zonal variation; underground wind speed; underground gas circulation; underground three-cell circulation.

## 0 引言

在地球表层存在有气圈和水圈。在地球内部唯一的流体圈层是外核。它的质量占到地球总质量的 1/3 强,其雷诺数高达  $3 \times 10^8$ 。傅承义估计“地球内部的物质流大概不会比大气中的湍流简单”<sup>[1]</sup>。有两类地下流体的运动会影响到短期( $10^{-1}$  a)气候变化:①外核磁流体,它是强对流不稳定体,其强脉冲对壳幔层的顶托作用,直接孕育着强地震<sup>[2]</sup>;两个外核脉冲的中点附近形成的“拍涡”<sup>[3]</sup>(或称为“共振涡”),是致洪暴雨的主要载体;②岩石圈裂隙中的渗流体,可将其称之为“地气”。其质量与大气圈相当,占地球系统总质量的  $10^{-6}$ (见后述)。在地壳中,除了某些包裹体外,全球地气(地壳中的气体)是相互连通的,这些气体是否会有大规模有组织的流动(地气环流)?迄今未见有人讨论过。我们知道,大气和海洋中之所以有全球性的大气环流和海洋环流,其根本原因是吸收的太阳辐射存在纬度差异<sup>[4]</sup>,低纬得热多,高纬少,热量从低纬输向高纬,因而产生了全球性大气环流和海洋环流。那么地气是否也存在全球性的地气环流?关键要看地气系统的热状况是否存在纬度差。从以下的计算可知,此种纬度差是明显存在的。

利用我国 239 个气象站多年地温资料计算了地气界面热通量随纬度的变化<sup>[5]</sup>,据此估算了地下流体(简称地气)运动速度的量级,然后根据地热涡运动速度反推出地气的运行速度,提出东亚地区的地气环流也是经向三圈的设想。

## 1 中国大陆地区地气界面热通量的计算结果

我国大陆气象站自 1954 年以来有 9 层地温观测,分别为 0.00、0.05、0.10、0.15、0.20、0.40、0.80、1.60 和 3.2 m,本文选取 0.0 m 和 3.2 m 两层。规定:只有当连续观测的时间大于或等于三年者,才用来计算土壤热通量,全国共用了 239 个站<sup>[5]</sup>。

传统上,土壤热通量(热传导部分)的计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$Q = C_m K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $Q$  为土壤热通量,向上为正, $C_m$  为土壤容积热容,是土壤密度和比热的乘积, $K$  是土壤导热率, $\frac{\partial T}{\partial z}$  是垂直方向上的土壤温度梯度。

关于土壤热通量的计算方法,主要有以下几种:魏东平等建立了一维双层介质模型来反演计算土壤热流<sup>[6]</sup>;范新岗等提出了分段拟合的计算方案<sup>[7]</sup>;王宝灵等利用逐步逼近法求得土壤导温率和土壤热流<sup>[8]</sup>;董文杰等在一定的假设条件下根据热传导方程推导出了土壤导温率的表达式,据此计算了多年平均的土壤热流<sup>[9]</sup>。逐步逼近法<sup>[10]</sup>虽然步骤较多,但它能计算出分月的地热流,计算精度较高,本文采用此计算方法。其缺点是:在春秋季节的过渡月份,各有 1~2 个月计算不稳定,对这几个月的地热流值,我们不用逐步逼近法,而用 Lagrange 差值法求得。因为过渡季节地热流的绝对值很小,对年总量的贡献很小,因而对结果影响不大。

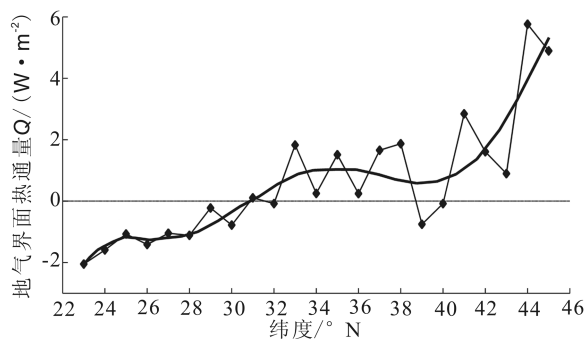


图 1 多年平均的地气界面热通量随纬度分布

各站土壤导温率  $K$  的计算可利用 0.0 m 和 3.2 m 两层资料计算得到<sup>[5]</sup>。求得  $K$  值后,由(1)式可算得  $Q$  值。式中  $C_m$  对不同的土壤取值应有差异,但由于观测资料很少,我们一律取为  $C_m = 1.3 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{C})$ 。据此,我们求出了全国每个站各月的  $Q$  值,相加而得到年平均的  $\bar{Q}$ ,再按  $1^\circ$  纬距为间距求得土壤热流平均值随纬度的变化(图 1)。从图 1 可看到,在低纬地区( $30^\circ\text{N}$  以南)土壤热流值为负值, $\bar{Q} < 0 \text{ W}/\text{m}^2$ ;大约在  $30^\circ\text{N}$  附近, $\bar{Q} \approx \text{W}/\text{m}^2$ ;在  $30^\circ\text{N}$  以北地区  $\bar{Q} > 0 \text{ W}/\text{m}^2$ ,也就是说  $30^\circ\text{N}$  是一个分界线。此计算结果如定性正确,则表明  $30^\circ\text{N}$  以南

的低纬是地热的积累区,30°N 以北的中高纬是地热的散散区,于是在地下亦必需有热量由低纬向高纬水平输送,方能取得地下热平衡。为了检验图 1 的准确性,我们再用文献<sup>[6-7,9]</sup>的方法,对图 1 进行了重复计算,发现除具体数值有些差别外,其基本特征,即 30°N 以南  $\bar{Q} < 0 \text{ W/m}^2$ ,30°N 以北  $\bar{Q} > 0 \text{ W/m}^2$ ,仍然清楚。地温资料的精度是 0.1℃,由此算得的地热流值可准确到 0.5 W/m<sup>2</sup>,而图 1 上高、低纬  $\bar{Q}$  的绝对值均达到 1 W/m<sup>2</sup> 以上,因此观测精度可以保证图 1 结果的可靠性。由此,我们可以认为:根据中国的观测结果,表明 30°N 以南的低纬为地下热的积累区,30°N 以北的高纬为地下热的耗散区,这就要求地下流体必需有向高纬的净热量输送,以达到地下纬度间的热量平衡。这表明地球系统从低纬向高纬输送热量,不但在大气圈和水圈中进行,在岩石圈中也同样进行。下节我们来估算此水平输送强度的量级。

## 2 由热通量南北梯度估算的地气运行速度 (地下风速)

通过岩石圈某一垂直剖面(如 30°N 剖面)的对流热通量( $q_c$ )可写成<sup>[10]</sup>

$$q_c = \rho c v T = \rho c \bar{v} \bar{T} + \rho c v' T' \quad (1)$$

式中  $\rho$  为地下流体密度(kg/m<sup>3</sup>), $c$  为比热(J/kg·K), $v$  为径向速度(m/s), $T$  为温度(K)。

假定  $v = v_s$ (南风) +  $v_n$ (北风),为保持质量守恒,可假定  $v_s = -v_n$ ,于是  $\bar{v} = 0$ 。

$$q_c = \rho c v' T = \rho v (v_s T_s + v_n T_n) = \rho c v_s (T_s - T_n) = \rho c v_s \Delta T \quad (2)$$

$T_s$ 、 $T_n$  分别为南风(向北输送)和北风(向南输送)的温度, $\Delta T = T_s - T_n$  可看成是同一纬圈上温度较高的半圈与温度较低半圈之间的差值,大体是 10°~20℃,于是对流热通量  $q_c$  就与地下南风风速成正比。

若认为中国的观测结果对北半球陆地具有代表性,即 30°N 以南地区地下得热平均为 2 W/m<sup>2</sup>;30°N

表 2 2003—2007 年中国地热流的逐月移动速率(单位:100 km/月)

速度	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计
频数	2	6	4	8	8	5	3	2	5	22	46	59	49	42	22	14	1	298
频率	0.7	2	1.	3	3	2	1.0	0.7	2	7	15	20	16	14	7	5	0.3	100

由表可见,向西退行的地热流约占总数的 13%,其最大速率为 -700 km/月,众数速率在 -300~-400 km/月之间,东行热流占总数的 87%,最大速率可达 900 km/月,众数速度是 400 km/月,

以北地区地下失热平均是 2 W/m<sup>2</sup>;0~30°N 区间陆地面积约占总面积的 1/3,可算得经过 30°N 地下垂直剖面要有 0.8×10<sup>14</sup> W 的热量输向 30°N 以北地下。

取岩石圈的厚度为 100 km,假定其中的孔隙率( $f$ )随深度呈指数递减<sup>[12]</sup>。在地表( $z = 2 \text{ km}$ ), $f = 10^{-1}$ ,在底部( $z = 100 \text{ km}$ ), $f = 10^{-5}$ ,得  $f = 0.1e^{-0.093z}$  可算得岩石圈中孔隙占据的空间相当 1.0 km 的厚度,其间充满了地下流体。取地下 0~100 km 的垂直剖面,将(2)式沿 30°N 纬圈进行面积分可得:

$$Q_s = 2r\pi \cdot h \cdot \rho c v \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: $Q_s = 0.8 \times 10^{14} \text{ W}$ , $r$  为地球半径, $h$  为流体厚度( $\approx 1 \text{ km}$ ), $\rho = 1.5 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ (对气体)或  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ (对液体), $c = 0.71 \text{ J/g} \cdot \text{°C}$ (对气体),若地下流体全为气体,可算得  $v = 188/\Delta T$ (cm·°C/s),可见地下风速  $v$  与  $\Delta T$  呈反比,两者的关系列于表 1。

可见地下风速的量级为 10<sup>-1</sup> m/s,比大气要小 2 个量级。 $v$ (或  $\Delta T$ )的具体取值取多少才符合实际?我们从地热流的运行速度也许能得到答案。

表 1 30°N 附近地气速度与 的关系

$\Delta T/\text{°C}$	5	10	15	20	30	40
$v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	37.6	18.8	12.5	9.4	6.3	4.7

## 3 2003—2007 我国地热流的移动速率

2001 年和 2008 年我国大陆经历了两次 8 级巨震,而 2003 年—2007 年的这 5 年间中国大陆受强震的影响较小,因此我们统计了这 5 年我国各月地气图上的地热流中心、月际正变温中心及多雨中心,发现三者之间的移动轨迹基本一致,而以多雨中心代表性最好,这是因为雨量站最密之故。用多雨中心代表地热流中心,也符合地热流的概念模式<sup>[11]</sup>。在历年逐月的地气图上计算出相邻两月之间地热流的距离,即可代表地热流的月运行速度(定义向西运动为负,向东运动为正),以 100 km/月为一档,统计了 5 年中不同速率地热流的出现频次,列于表 2<sup>[12]</sup>。

速率在 300~600 km/月之间者占总数的 65%。若地下气体的平均流速是 0.1~0.3 m/s(相应的  $\Delta T$  为 30~10℃),则地气系统(地热流)的移速与“地下风速”大体相等。这不足为怪,因为天气系统与气流

的平均速度( $\approx 10$  m/s)亦大体相等。

#### 4 强震涡运动速度的证据

1954 年以来,我国大陆发生了  $M_s = 6$  以上强震一百多次(余震不计)。依据震后多雨区的移动方向,我们对震涡移向进行了统计<sup>[15]</sup>,发现  $M_s \leq 6.5$  的地震,震涡均是向东移动。而  $M_s \geq 7.0$  的强震,其震涡总有几个季度是向西退行。文<sup>[5]</sup>列出了 1954—2005 年我国大陆 26 次  $M_s \geq 6.9$  震的震涡西退速度。 $M_s = 6.9$  的 3 次个例,西退速度均为 0。故  $M_s = 6.9$  震涡可以看成是“驻涡”。根据文献<sup>[13]</sup>,地震异常前兆距未来震中的最远距离(它可看成是震涡的半波长),5.0~5.9 级(平均是 5.5 级)为 230 km,6.0~6.9 级(平均是 6.5 级)为 294 km,7.1~7.8 级(平均是 7.4 级)为 435 km,据此得到 6.9 级震涡的半波长约为 350 km。

岩石圈中的地气环流虽遭受着其中的固体物质的阻挡,而比大气环流弱很多,但它毕竟也是旋转地球上的流体,大气环流和海洋环流上的一些基本定理,也同样适用于地气环流,特别是 Rossby 长波公式。其驻波公式是

$$L_s = 2\pi(v/\beta)^{1/2}$$

式中: $v$  为地气平均速度; $\beta = 2\omega \cos\varphi/R$ , $R$  为地球半径; $L_s$  为驻波波长; $\varphi$  为纬度; $\omega$  为地球自转角

速度。

将驻波波长  $L_s = 2 \times 350$  km = 700 km,代入上式可算得  $v = 20$  cm/s(取  $\varphi = 45^\circ N$ )。这与上节得到的地气速度相等。这对取地气平均速度为 20 cm/s 又是一个强力支持。

#### 5 岩石圈中的地气环流亦为经向三圈环流的证据

既然地气环流的形成原因本质上与大气环流和海洋环流一样,都是由于得到的热量存在纬度差异而驱动的,它应该与大气(或海洋)一样,存在经向三圈环流,在中纬度应该有一个反环流圈。可是由于地球的“不可入性”,人们不能直接观测到此反环流圈,只能从地表可观测现象进行间接推断。我们知道,马纬度是全球著名的少雨沙漠区,大气环流对此做出了经典性解释<sup>[14]</sup>。地气环流的中纬度若存在反环流圈则也可以对此进行解释:地气环流的中纬度反环流圈使中纬度地区平均表现为下沉运动。于是地内中纬度是地热涡不活跃地区,致使干旱少雨。地内中纬度存在反环流圈也可解释我国东部淮河流域(约  $31^\circ \sim 35^\circ N$ )是地热涡出现频率最小的地域,是地壳稳定区<sup>[15]</sup>,也是全国  $M_s \geq 4.75$  地震出现最少的地区之一<sup>[16]</sup>。

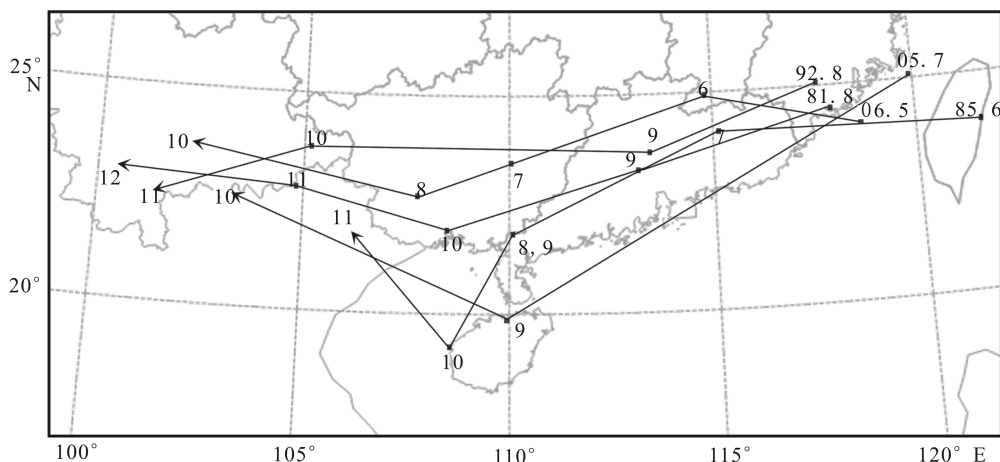


图 2 25°N 以南的华南地区多雨中心西行轨迹图

三圈环流的显著标记之一是低纬地区为赤道东风带。低纬的地气是否吹东风?下面举两个间接证据。

①我国 25°N 以南的华南沿海地区,有些年份的下半年逐月多雨中心是往西移动的。图 2 所示为 1981-08-12 月,1985-06-11 月,1992-08-11 月,

2005-07-10 月和 2006-05-10 月 5 次月多雨中心的西移轨迹。这是低纬地区夏季可能为地下东风的证据之一。

②在西北太平洋上,自低纬(印尼、菲律宾)到高纬(北海道、勘察加)发生过很多次大于等于 7.8 级的强震<sup>[16]</sup>,由上节所述可知,其震涡尺度均大于驻

波的临界尺度。强震发生后,震涡均是朝地下气流的反方向移动。表3列出西北太平洋1951—2007年23次大于等于7.8级大震的个例。

利用NCAR/NCEP月降水资料绘出的全球历年逐季(3—5月为春季,余类推)降水距平百分率分

布图(中国地域根据国家气候中心的资料),我们给出了各次强震当季及后数季的平均多雨中心的连线(图3)。应予说明的是少数强震在其东西两边都有多雨带存在,我们只绘出其中的最强多雨带(即多雨区范围宽、多雨中心强度大者)。

表3 西北太平洋1951—2007年 $M_s \geq 7.8$ 大震目录

序号	年月	震中		震级 $M_s$	序号	年月	震中		震级 $M_s$
		$^{\circ}N$	$^{\circ}E$				$^{\circ}N$	$^{\circ}E$	
1	1969-11	58	164	7.9	12	1952-03	42	143	8.3
2	1997-12	55	162	7.8	13	2003-09	42	144	8.0
3	1952-11	53	160	8.1	14	1986-05	41	143	7.9
4	1959-05	53	160	8.1	15	1983-05	41	139	7.8
5	2006-11	47	153	8.0	16	1953-11	34	142	8.0
6	2007-01	46	154	7.9	17	1981-01	29	128	8.0
7	1958-11	45	148	8.1	18	1966-03	24	123	7.8
8	1963-10	45	150	8.1	19	1972-01	23	122	8.0
9	1978-12	44	146	8.1	20	1990-07	13	121	8.0
10	1994-10	44	146	7.9	21	1952-03	10	127	7.9
11	1973-06	43	146	7.9	22	1976-08	6	124	8.0

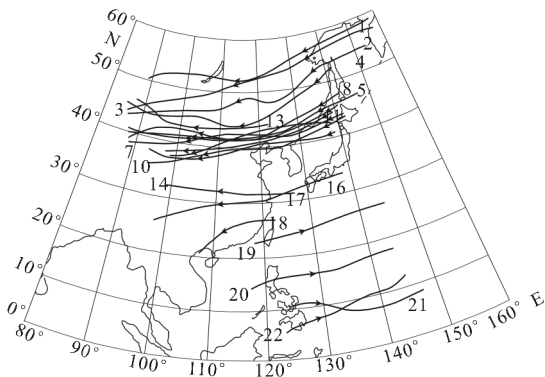


图3 西太平洋 $M_s \geq 7.8$ 强震后,多雨中心逐季移动轨迹图

从图3可见,大体是 $25^{\circ}N$ 以北的强震,对应的多雨中心都是向西退,表明中高纬度的地下风是“东风”; $20^{\circ} \sim 25^{\circ}N$ 的强震处在过渡带上, $20^{\circ}N$ 以南的强震,对应的多雨中心是向东进,表明低纬地区的地下风是“西风”。这与地气三圈环流所要求的刚好一致。从图3亦可知: $30^{\circ} \sim 40^{\circ}N$ 之间的中纬度大震极少, $41^{\circ}N$ 以北或 $30^{\circ}N$ 以南大震很多,这也可以从地下三圈环流得到解释。

## 6 结论

通过本文分析,可得到以下结论:

(1) 中国239站多年各层地温的观测结果表明: $30^{\circ}N$ 以南为地下热的净吸收区, $30^{\circ}N$ 以北为地下热的净放散区,热量收支的量值大概是 $2 W/m^2$ 。于是地下必需有热量从低纬输向高纬。它们基本上

要靠地下流体的运动来完成此输送。

(2) 在一些合理的假定之下,可算得地下气体的平均运行速度约为 $10 \sim 20 cm/s$ 。根据2003—2007年中国地热涡的逐月移动速率也可推知,地下风速平均约为 $10 \sim 30 cm/s$ 。

(3)  $M_s = 6.9$ 的震涡,其涡长约为 $700 km$ ,它可看成是运行速度为零的“驻涡”。按Rossby公式可算得地气的平均风速约为 $20 cm/s$ 。

(4) 从 $M_s \geq 7.8$ 强震涡的后退移动可知 $25^{\circ}N$ 以南的低纬地区为地下东风。据此可推知地气环流也是经向三圈环流。

## 参考文献

- [1] 傅承义.地震预测工作的一些反思[M]//八十年代中国地球物理学进展-纪念傅承义教授八十寿辰.北京:北京学术书刊出版社,1989:1-4.
- [2] 汤懋苍,惠小英,郭维栋,等.强地震前的“干热异常”与地温降水波应变弱停[J].西北地震学报,2009,32(1):99-104.
- [3] 汤懋苍,廖留峰,梁丰,等.两强震涡中点的“拍涡”引发致洪暴雨初探[J].地球物理学进展,2013,28(5):2241-2246.
- [4] 李崇银.气候动力学引论[M].北京:气象出版社,1995:25-40.
- [5] 汤懋苍,赵红岩,张存杰,等.地气图预测气候变化的原理和方法[M].北京:气象出版社,2007:36-39.
- [6] 魏东平,石耀霖,汤懋苍,等.利用气象地温资料反演大地热流[J].地球物理学报,35(6):1992:733-739.
- [7] 范新岗,汤懋苍.土壤传导-对流热流通量计算的初步结果[J].高原气象,1994,13(1):14-19.
- [8] 王宝灵,汤懋苍.我国土壤热流计算结果的初步分析[J].科学通报,1993,38(11):1013-1016.

- [9] 董文杰,汤懋苍.用气象站地温资料计算多年平均土壤热流的初步结果[J].高原气象,1992,11(2):115-124.
- [10] 吴国雄,刘辉,等.校译.气候物理学[M].北京:气象出版社,1991:182-186.
- [11] 汤懋苍,高晓清.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[J].中国科学(B辑),1995,25(12):1313-1319.
- [12] 汤懋苍,成青燕,张东方,等.天气图预测全国月降水的实践总结[J].高原气象,2008,27(5):1054-1059.
- [13] 梅世蓉,冯德益,张国民,等.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993:232.
- [14] 汤懋苍,江灏,柳艳香,等.全球各类旱区的成因分析[J].中国沙漠,2002,22(1):1-5.
- [15] 汤懋苍,高晓清.1980—1993年我国“地热涡”的若干统计特征Ⅰ.“地热涡”的时空分布[J].中国科学(B辑),1995,25(11):1186-1192.
- [16] 高晓清,汤懋苍,郭维栋,等.西北太平洋  $M \geq 7.8$  级强震影响我国月季降水场的过程分析[J].地球物理学报,2008,51(4):1022-1028.

\*\*\*\*\*

(上接 355 页)

- [10] 王红兵.高密度电法在岩溶勘察中的应用和研究[J].工程地球物理学报,2012,9(5):551-554.
- [11] 蒋富鹏,肖宏跃,刘垒,等.高密度电法在工程岩溶勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2013,10(3):389-393.
- [12] 张迪,李家存,吴中海,等.探地雷达在探测玉树走滑断裂带活动性中的初步应用[J].地质通报,2015,34(1):204-216.
- [13] 牛建军,杜立志,谷成.岩溶探测中的弹性波 CT 方法[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(4):630-633.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.DL/T51031-2014,火力发电厂岩土工程勘测技术规程[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [15] 蔡玲玲,杨岐焱,郭秋娜,等.综合地球物理方法在地震安全评价中的应用和成果[J].华北地震科学,2006,3(1)21-29.