

96 mL/g, 此值接近地层中现存的甲烷含量. 这说明, 如不考虑甲烷在地层中的损失, 仅从干酪根生烃能力的角度来看, 该地层中的甲烷应主要来自干酪根的热演化. 然而, 考虑到地质作用的复杂性, 例如甲烷在地层中的散失, 以及可能的早期生物降解作用等都可能改变气体的数量及成分, 故还应结合其他的方法, 例如同位素分析、地质构造研究等, 才能得出最终的合理结论.

(2) 甲烷及 R^0 的动力学研究为模拟实验数据用于地质条件下的油气预测提供了一个合理的途径. 这种方法通过化学反应动力学理论建立了模拟实验数据与地质应用之间的联系, 因而较之传统的模拟实验方法, 在理论基础及应用效果上都有很大的提高. 目前在美国^[4]、加拿大(Chevron 石油公司内部资料)及中国^[5, 6]等一些油气田的地球化学研究及油气勘探中已应用了这种方法, 并取得了良好的效果.

参 考 文 献

- 1 Ungger P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins. *Nature*, 1987, 327: 52~ 54
- 2 Behar F, Tang Y, Liu J. Comparison of rate constants for some molecular tracers generated during artificial maturation of kerogens: influence of kerogen type. *Organic Geochemistry*, 1997, 26: 281~ 287
- 3 Braun R L, Burgham A K. Analysis of chemical reaction kinetics using a distribution of activation energy and simple models. *Energy and Fuels*, 1987, 10: 153~ 161
- 4 Tang Y, Jenden P D, Nigrini A, et al. Modeling early methane generation in coal. *Energy and Fuels*, 1996, 10: 659~ 671
- 5 刘金钟, 唐永春. 多冷阱热解气相色谱仪对生油岩生烃动力学的研究. *科学通报*, 1996, 41(10): 1 021~ 1 024
- 6 刘金钟, 唐永春. 石油中正构烷烃的生成动力学研究. *科学通报*, 1997, 42(3): 303~ 305

(1997-08-19 收稿, 1998-01-19 收修改稿)

地球内部热散失量分布的非对称性

汪 洋 汪集旻 马宗晋^④

(中国科学院地质研究所, 北京 100029; ④国家地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 采用 Pollack 等人 1993 年给出的全球热流场 12 阶球谐系数, 求出南、北半球以及 0° 半球、 180° 半球的平均热流值和热散失量. 计算结果表明, 南半球平均热流值为 $99.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于北半球平均热流值 ($74.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$); 0° 半球的平均热流值 ($94.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 也高于 180° 半球 ($79.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$). 南半球的地幔热散失量达 $22.1 \times 10^{12} \text{ W}$, 是北半球地幔热散失量 ($10.8 \times 10^{12} \text{ W}$) 的两倍; 0° 半球的地幔热散失量为 $16.9 \times 10^{12} \text{ W}$, 与 180° 半球的地幔热散失量 $16.0 \times 10^{12} \text{ W}$ 相近. 大陆与海洋在全球的非对称分布是导致地球内部热散失量具有半球非对称性的原因. 热散失量的非对称分布是地质历史中的长期现象.

关键词 大地热流 热散失量 地球的非对称性

对大地水准面形态、全球构造以及地震层析成像三维结果的分析揭示, 地球具有半球尺度的非对称性^[1]. Pollack 等人^[2]指出, 南半球热流值高于北半球, 但他们没有给出各半球的平均热流值. 文中计算了南、北半球以及以 0° 经线为中心的 0° 半球和以 180° 经线为轴的 180° 半

球的平均热流值和热散失量, 以及相应的地幔热散失量的估计值, 还按 0° 和 180° 半球的南、北半部分别计算出四分之一地球球面的相应数值. 目的在于揭示地球南北半球之间的纬向非对称性, 以及 0° 与 180° 半球之间的经向非对称性.

1 计算方法及结果

1993 年 Pollack 等人^[2] 汇编了包含全球 24 774 个热流观测值的最新热流数据集, 他们根据大陆热流值与地质体最后一次构造热活化事件的年龄之间的经验关系, 以及大洋岩石圈年龄同大洋热流值的关系, 对没有观测值的地区的热流值进行估值, 得到以 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格覆盖全球的热流数据集, 并对该数据集的球谐分析给出了 12 阶的正则化球谐系数. 文中采用这些系数, 求出全球每个 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格中心的热流值. 以这些值代表相应网格的平均热流值, 计算按面积加权的半球和四分之一球面的平均热流值, 用平均热流值乘以面积即得出相应的热散失量值.

计算结果显示, 地球表面热散失量的分布存在半球非对称现象. 南、北半球之间, 0° 半球、 180° 半球之间在平均热流值及相应的热散失量方面差异明显 (表 1). 南半球的平均热流值达 $99.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 高出全球平均值 ($87 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 14%; 而北半球平均热流值是 $74.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 比全球平均值低 15%. 0° 半球的平均热流值为 $94.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 高出全球平均值 8%; 180° 半球平均热流值是 $79.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 比全球平均值低 9%. 在热散失量上, 全球热散失量 ($44.2 \times 10^{12} \text{ W}$) 中的 57%, 即 $25.3 \times 10^{12} \text{ W}$ 来自南半球, 43% 来自北半球 ($18.9 \times 10^{12} \text{ W}$). 南半球高出北半球 33%. 0° 半球的热散失量是 $24.0 \times 10^{12} \text{ W}$, 占全球总量的 53%; 180° 半球热散失量是 $20.2 \times 10^{12} \text{ W}$, 为全球总量的 47%. 值得注意的是, 纬向半球之间的差异程度大于经向半球 (0° 半球与 180° 半球) 之间的差异程度.

四分之一球面的平均热流值和热散失量分布仍然显示出非对称性. 0° 半球南半部的平均热流值是 $111.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 高出全球平均值 29%. 180° 半球南半部的平均热流值与全球平均热流值相当, 为 $86.8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 0° 半球北半部与 180° 半球北半部的平均热流值分别为 76.3 和 $71.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 明显低于全球平均值 (低 12% 和 18%). 在热散失量方面, 0° 半球南半部的热散失量为 $14.3 \times 10^{12} \text{ W}$, 占全球总量的 32%, 而 180° 半球南半部热散失量为 $11.1 \times 10^{12} \text{ W}$, 占 25%. 0° 半球北半部的热散失量占全球总量的 22%, 为 $9.7 \times 10^{12} \text{ W}$, 而 180° 半球北半部则是 $9.1 \times 10^{12} \text{ W}$, 占 21%.

表 1 地球表面平均热流值及热散失量

	平均热流值/ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	热散失量/ 10^{12} W
全球 ^[2]	87 ± 2.0	44.2 ± 1.0
北半球	74.0 ± 1.8	18.9 ± 0.5
南半球	99.3 ± 2.1	25.3 ± 0.5
0° 半球	94.1 ± 1.9	24.0 ± 0.5
180° 半球	79.3 ± 2.0	20.2 ± 0.5
0° 半球北半部	76.3 ± 1.8	9.7 ± 0.2
0° 半球南半部	111.9 ± 2.0	14.3 ± 0.3
180° 半球北半部	71.7 ± 1.9	9.1 ± 0.2
180° 半球南半部	86.8 ± 2.1	11.1 ± 0.3

要揭示地幔热散失量分布的非对称性, 必须从地表热散失量中扣除大陆地壳放射性元素

的生热贡献量. 大陆的平均热流值是 $65 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[2]. 稳定的加拿大东部地盾之下的地幔热流值为 $12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[3], 该值代表了大陆地幔热流值的下限. 由此得到大陆地壳的平均放射性生热热流值的上限是 $53 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 该值乘以大陆面积即得到大陆地壳放射性生热量的估计值. 全球大陆总面积为 $214 \times 10^6 \text{ km}^2$ (包括被水域覆盖的大陆地区面积)^[4]. 根据世界地图估计了各个四分之一球面内的大陆面积. 0° 半球南、北半部的大陆面积分别是 40×10^6 和 $94.7 \times 10^6 \text{ km}^2$. 而 180° 半球南、北半部的大陆面积为 20×10^6 和 $59.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[5,6]. 相应的大陆地壳放射性生热量和地幔热散失量的估计值列于表 2.

表 2 地幔表面热散失量估计值(单位: 10^{12} W)

	大陆地壳放射性生热总量估计值	地幔表面热散失量估计值
全球	11.3	32.9
北半球	8.1	10.8
南半球	3.2	22.1
0° 半球	7.1	16.9
180° 半球	4.2	16.0
0° 半球北半部	5.0	4.7
0° 半球南半部	2.1	12.2
180° 半球北半部	3.1	6.0
180° 半球南半部	1.1	10.0

地幔热散失量的分布主要表现为纬向非对称性. 南半球为 $22.1 \times 10^{12} \text{ W}$, 占全球地幔热散失量 ($32.9 \times 10^{12} \text{ W}$) 的 67%, 是北半球 $10.8 \times 10^{12} \text{ W}$ 的两倍. 相反地, 0° 半球为 $16.9 \times 10^{12} \text{ W}$, 仅比 180° 半球的 $16.0 \times 10^{12} \text{ W}$ 高出 6%. 0° 半球南、北半部之间的地幔热散失量相差 $7.5 \times 10^{12} \text{ W}$; 180° 半球南、北半球之间相差 $4.0 \times 10^{12} \text{ W}$. 而 0° 半球北半部与 180° 半球北半部之间相差 $1.3 \times 10^{12} \text{ W}$; 两半球的南半部之间相差 $2.2 \times 10^{12} \text{ W}$ (见表 2). 这些都说明地幔热散失量分布的纬向非对称性远较经向非对称性显著.

2 讨论

地球热散失量的非对称分布起源于大陆和海洋地理分布上的非对称性. 全球热散失量之中的 70% 来自海洋岩石圈, 而且通过大洋中脊及其周围的新生代海洋岩石圈散失的热量超过全球总量的一半^[2]. 南半球集中有 3 条洋中脊, 东太平洋中脊、印度洋中脊和南大西洋中脊, 以及全球海洋岩石圈的 66%. 北半球仅分布有北大西洋中脊以及东太平洋中脊、印度洋中脊最北端的部分, 海洋岩石圈面积为全球的 34%. 这种地理特征导致南半球的平均热流值和热散失量均显著高于北半球. 0° 半球分布有全球 40% 的海洋岩石圈, 以及印度洋中脊、北大西洋中脊和南大西洋中脊, 而 180° 半球集中有全球 60% 的海洋岩石圈和东太平洋中脊. 所以 0° 半球的热散失量仅仅略高于 180° 半球. 0° 半球南半部分布有全球 30% 的海洋岩石圈和两条洋中脊, 印度洋中脊和南大西洋中脊. 180° 半球南半部集中了全球 36% 的海洋岩石圈和东太平洋中脊. 因此 0° 半球南半部的平均热流值和热散失量均高于 180° 半球南半部. 0° 半球北半部分布有全球 11% 的海洋岩石圈和北大西洋中脊, 而 180° 半球北半部分布有全球 23% 的海洋岩石圈; 所以两者的平均热流值比较接近.

由于存在着超级联合大陆的聚合与离散, 大陆与海洋在地理分布上的非对称性是地质历史中的普遍现象. 这意味着热散失量分布的非对称性也是在地质历史进程中长期出现的现

象,这是基于热散失量分布同大陆、海洋地理分布之间的内在关系而得出的结论. 2 500 Ma 以来全球形成过 5 个超级大陆,超级大陆的长轴或沿径向半球展布,或沿纬向半球分布^[8]. 250 Ma 时形成的 Pangaea 超级大陆是一个经向大陆;相应地,大陆、海洋以及全球热散失量的分布表现为明显的经向非对称. 180 Ma 时 Pangaea 发生裂解,导致大西洋的张开和南半球 Gondwana 大陆的裂解. 大陆、海洋以及全球热散失量的分布由经向非对称转变为纬向非对称. 850 Ma 时形成的超级大陆 P 850 Ma 是纬向大陆. 从该大陆裂解之时到 Pangaea 超级大陆的形成之时,大陆、海洋以及全球热散失量的分布从纬向非对称转变为经向非对称. 王鸿祯^[8]指出,自 1 950 Ma 以来,径向超级大陆与纬向超级大陆相间出现;这说明至少从 1 950 Ma 以来,地球热散失量的分布已具有非对称特征.

Pollack 等人^[7]指出,岩石圈厚度与热流值之间存在着明显的反相关关系. 南半球的平均热流值比北半球高很多,所以南半球岩石圈的平均厚度要比北半球薄. 南半球较薄的岩石圈意味着,南半球岩石圈是相对伸展的,而北半球岩石圈是相对收缩的. 地幔热散失量的非对称分布指示了地幔热对流体系统上边界层的非均匀性. 这种非均匀性起源于地幔热对流系统与大陆板块的动力学耦合^[9,10]. Forte 等人^[11]指出,地幔热散失量的大小正比于地幔内的垂向对流热通量,而后者的对地幔内部横向非均匀程度在垂向上的变化幅度十分敏感. 所以推断地幔内部的大尺度非均匀性与地幔表面热散失量分布的非对称性之间可能有某些内在联系.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49733011)和中国科学院“九五”重大项目(批准号: KZ951_A1_401)的资助.

参 考 文 献

- 1 马宗晋,杜品仁. 现今地壳运动问题. 北京:地质出版社,1995
- 2 Pollack H N, Hunter S J, Johnson T R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set. *Review of Geophysics*, 1993, 31: 267~ 280
- 3 Pinet C, Jaupart C, Mareschal J C. et al. Heat flow and structure of the lithosphere in the Eastern Canadian Shield. *J Geophys Res*, 1991, 96: 19 941~ 19 963
- 4 中国科学院地球化学研究所. 简明地球化学手册. 北京:科学出版社,1977
- 5 地图出版社编. 袖珍世界地图册. 上海:地图出版社,1981
- 6 上海辞书出版社编. 世界地名词典. 上海:上海辞书出版社,1981
- 7 Pollack H N, Chapman D S. On the regional variation of heat flow, geotherm, and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, 1977, 38: 279~ 296
- 8 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考. *地学前缘*, 1997, 4(3): 1~ 12
- 9 Gurnis M. Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents. *Nature*, 1988, 332: 695~ 699
- 10 Zhong S, Gurnis M. Dynamic feedback between a continentlike raft and thermal convection. *J Geophys Res*, 1993, 98: 12 219~ 12 232
- 11 Forte A M, Woodward R L. Seismic-geodynamic constraints on three-dimensional structure, vertical flow, and heat transfer in the mantle. *J Geophys Res*, 1997, 102: 17 981~ 17 994

(1997-08-29 收稿, 1998-02-18 收修改稿)