

地核物态及其量子地球动力探讨

陈 志 耕

(中国矿业大学 研究生院, 北京 100083)

摘 要: 根据量子力学原理对地核物质状态进行分析, 简要计算了现代地球内核超固态物质原子中被公有化电子的平均值、地核物质的公有化自由电子浓度、现代地球内核中自由电子平均运动速度、早期产生地核物质量子效应的自引力压强临界值和起动地球整体膨胀的自引力压强、地核发生超固态量子力学效应所需要的能量等参数。内地核物质很可能是在超高压环境下形成的一种特殊物质状态——超固态。地核超固态产生的量子排斥压强超过地球自引力收缩压强的临界值时, 导致地球发生整体的膨胀, 由此引出量子地球构造动力的概念。

关键词: 地核物态; 超高压; 超固态; 地球膨胀; 量子地球动力

中图分类号: P541 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2002)04-0273-06

地球深部物态和与其密切联系的地球动力学问题, 是地球科学两个重要的基本问题。但是, 地球深部物态与地球动力来源问题, 目前乃是尚不清楚的问题。

诚然, 这种状况与地球固态物质研究本身的复杂性和获得深部资料的困难等有关。但是, 对超高压实验研究结果认识上的误解, 则是一个非常重要的原因。

重新检查超高压实验结果及其有关的资料解释、对比和使用情况表明^①: 由于未能按照模拟实验必须遵守的相似原理进行实验参数的匹配研究和实际应用, 作为建立地球传统模型重要依据的超高压实验结果, 在其可靠性上存在着较大疑问; 超高压实验结果可以为确定地核物质成分提供重要依据, 但是它不能确定地球核部超高压条件下的物质赋存状态。地核的物质成分与物质状态有联系, 但它们并不完全是一回事。因此, 有必要重新审视那些因为超高压的实验结果而“夭折”的一些重要学术思想及其研究结果, 并在现代科学的基础上进行深入探讨。

关于地核物质状态的认识, 早在 20 世纪 40~60 年代, 有人就曾提出过一种地核物质的特殊状态理论——地核“金属化”物态理论^[1~3]。该理论根据量子力学关于电子简并压理论提出了地核物质的金属化相变问题, 认为地核物质向这种状态的转变相当急剧, 完全可以解释地核边界上的不连续性。A

· Φ · 卡普斯钦斯基^[4,5]运用科学上相对独立的方法, 即元素周期分析、量子力学等方法, 分析地核物质状态后指出: 地核是由浸没在压缩的电子浆液中的原子核所构成, 所有的原子都具有金属态特性^[4], 而且在这个区域里的所有自然物质不论其化学性质如何, 都转变为以自由电子存在为特征的金属状态^[5]。N. Kawai(1976)通过实验证明: 在大于百万帕的压力下, Fe_2O_3 、 NiO 、 SiO_2 的导电率突然变化, 发生了金属化。刘英俊等^[6]指出, 在超高压条件下, 深度相当于 2 900 km 的地带, 压力达到百万个大气压以上, 此时原子的核外电子层完全被破坏, 电子呈自由状态, 为所有原子核公有, 因此, 所有元素在超高压下, 均呈超导电性的金属状态。

上述关于地球深部特别是地核物质状态问题的一些具有重要意义的学术思想及其一系列研究结果, 基本上为六七十年代冲击波超高压实验结果这一“事实证据”所否定。当然, 上述地核物态问题研究探讨本身也不完善。另一方面, 在地核物态的认识上还存在着一种误解, 以为超高压实验结果佐证了以铁镍为主的地核物质成分, 就等于根本否定了地核“金属化”特殊物质状态的存在, 把地核的物质成分与地核的物质存在状态完全等同起来。显然, 以铁镍为主的物质成分, 并不等于证实了这些物质一定就是以接近于常态下一般的固体状态存在。

① 陈志耕等, 地球深部超高压实验的理论依据问题讨论, 1998.

1 地核超高压特殊物态力学平衡及其量子状态参数

“物态”是大量的微观粒子在一定的温度和压力下相互集聚为一种稳定的结构状态,一般称之为“物质的一种状态”,简称物态^[7]。任何一种物质在不同的温度、压力和外场影响下都将呈现出不同的物态。物质最一般的固、液、气三态,仅仅是在宏观热力学范围内进行区分的狭义物态。广义地说,特别是从温度变化之外的因素,如压力、物质的微观结构和有序无序程度等,区分物质状态时,物质状态还有等离子态、结晶态、非晶固态、液晶态、超导态、超流态、超固态、中子态等等^[7]。

在超高压(100 GPa 以上)作用下,原子的最外层价电子被完全公有化,形成的金属氢以及金属化的碘、硒、碲、硫、氙和与钛离子性质相似的高压钙等物质状态,就是一些“金属化”的物态(140 GPa 左右);当物质存在的环境压力较之形成金属化物态的超高压更高时(如 300 GPa),物质原子的其它电子壳层也被“挤破”,更多核外电子被公有化,形成“超固态”物质状态^[7]。理论分析^[1~5]和实验研究^[8,9]已经表明,物质原子受到超高压作用和泡里不相容原理(Pauli exclusion principle)两方面的限制,有一部分核外电子在超高压的压缩中获得能量,使其能级升高足以脱离各自的原子核束缚,成为能够自由运动的公有化自由电子,即压致电离^[10]。根据量子力学原理,大量公有化自由电子的简并电子气将产生巨大量子压强,并形成其特有的量子效应。这种简并电子气的量子效应,由薛定谔方程的波函数解推导得出的泡里不相容原理和海森堡测不准原理(uncertainty principle)来描述和说明^[11,12]。

因此,在地球核部超高压(136~363 GPa)的条件下,物质将被压缩到其点阵结构与原子内的壳层结构不复存在的状态,物质的电子密度也达到足够高的程度,电子可近似地作为连续分布的部分简并性费米—狄拉克气体处理;原子核被高密度的电子所屏蔽,长程库伦相互作用变得无足轻重。地核这种被高度压缩物质的近似结构模型,显然是托马斯—费米模型(TF)或统计近似模型。描述这种物质状态的是托马斯—费米状态方程和托马斯—费米—狄拉克(TDF)状态方程。

根据 TDF 模型的状态方程,作为费米子的自由电子在体积为 V 的物质内所产生的量子简并压强 P_s 、总电子数 N 、费米能量 E_F 有如下关系^[10]:

$$P_s = 2NE_F/5V. \quad (1)$$

完全简并气体中的费米能量 E_F ,是自由电子的最高能量(费米能量 E_F 又称为化学势)^[12],在三维系统中费米能是单位体积内的电子数 N/V 的函数。三维系统的费米能由下式计算^[13]:

$$E_F = \frac{h^2}{8m} (3N/\pi V)^{2/3}, \quad (2)$$

普朗克常数 $h = 6.626\ 18 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; 电子质量 $m = 9.109\ 5 \times 10^{-28} \text{ g}$ 。(2)代入(1)得

$$P_s = \frac{h^2}{20m} (3/\pi)^{2/3} (N/V)^{5/3}. \quad (3)$$

地球自引力(下标“ g ”)作用在地球内部产生的压强 P_g 为

$$P_g = -[GM\rho(r)]/r^2, \quad (4)$$

万有引力常数 $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$; M 为半径 r 以内地核物质的质量; $\rho(r)$ 为地核内半径 r 处的物质密度。

$$\text{令 } a = \frac{h^2}{20m} (3/\pi)^{2/3}, \text{ (3) 式变为}$$

$$P_s = a(N/V)^{5/3}. \quad (5)$$

当地球内部的引力压强与量子排斥压强平衡时有

$$P_s = P_g = P. \quad (6)$$

由(5)、(6)式得

$$P_g = a(N/V)^{5/3}. \quad (7)$$

再令 $b = 1/a^{3/5} = 9.492 \times 10^{15}$, 则由(7)式,便可得到目前地核物质的自由电子总数 N 与地球自引力压强 P_g 、地核体积 V 有如下关系

$$N = bVP_g^{3/5}. \quad (8)$$

将 PREM 模型所给出的内、外地核边界条件 $r = 1\ 221.5 \text{ km}$ 、 $P_g = 328.9 \text{ GPa}$,代入(8)便可得到目前地球内核特殊物态的物质中自由化电子总数为

$$N_{ic} = 2.348 \times 10^{48}.$$

将该值代入(2)式得到内地核公有化自由电子的最低费米能值为

$$E_{icF} = 16.6 \text{ eV}.$$

由上述过程可知,计算得出的费米能值 E_{icF} 是 N_{ic} 个自由电子在体积为 V_{ic} 、均匀压力为 P_g 的内地核空间中的电子最大能量。根据功能原理,增加的电子能量来源于超高压对内核物质压缩做功的转化能量。该转化能量可以从由粒子总数 N_{ic} 与平均费米能 E_{icF} 计算得出。

电子气的自由电子平均能量由下式给出^[12]

$$E_{\text{平均}} = 3E_F/5, \quad (9)$$

电子气的总能量为^[12]

$$E_{\text{气}} = NE_{\text{平均}} = (3/5)(NE_{\text{F}})。(10)$$

将内地核 $N_{\text{ic}} = 2.35 \times 10^{48}$ 、 $E_{\text{icF}} = 2.66 \times 10^{-18} \text{ J}$ 代入(10)式,得到地核物质的自由电子气总能量 $E_{\text{气}} = (3/5) \times 2.35 \times 10^{48} \times 2.66 \times 10^{-11} = 3.75 \times 10^{30} \text{ J}$ 。该值也是地球自引力超高压形成地核特殊物态——超固态所需要的能量。

根据宇宙化学等研究结果,地核成分基本上为纯铁,含有少量的镍和 10% 左右的硫或者硅、氧等轻元素^[14,15]。因此,作为一种近似模型,地核物质成分可以视为完全由纯铁组成,地核物质的原子数量近似等于 Fe 原子的数量。据此近似模型,内地核物质的电子费米能值,恰好是常态下 Fe 原子费米能的 2 倍。由内地核物质质量 $9.71 \times 10^{25} \text{ g}$ 和 Fe 原子质量 $9.274 \times 10^{-23} \text{ g}$,可以得到内地核物质的原子总数 N_{ic} 为 1.046×10^{48} 个。

上述结果至少可以引出下述几个重要结论。

1. 内地核物质状态的量子效应是地球核部物理与地球演化等不容忽略的一种重要效应。由上述 N_{ic} 、 V_{ic} 值,可得出内地核物质中的公有化自由电子浓度 η_{ic} 为 $3.08 \times 10^{23} \text{ 个/cm}^3$ 。而电子的量子理论表明,当自由电子密度达到量子浓度 $4.81 \times 10^{21} \text{ 个/cm}^3$ 时,电子气便完全简并化^[10,13]。因此,地核物质的电子浓度实际上已经达到简并量子浓度的 36~64 倍。所以,内地核物质公有化自由电子处于高度的简并状态而且必然要产生强烈的量子效应。

2. 虽然在超高压下的内地核物质具有强烈的量子效应,但是内地核物质状态尚未达到具有相对论效应的更高能物质状态。根据 $E = 1/2(mv^2)$ 和内地核中自由电子的费米能 N_{ic} ,可得出内地核公有化自由电子的运动速度为 $2.417 \times 10^8 \text{ cm/s}$,由于其速度值小于光速 ($2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$),故内地核的公有化电子仍为非相对论性费米子。

3. 地球内核特殊物质状态中的原子平均被公有化的电子数,完全是地球物质原子的电子组态与星系物态能量环境相比较的可能值和允许值。由内核自由电子总数 N_{ic} 与内核物质的原子总数 N_{ia} ,得到内核物质平均每个原子失去的电子数(即公有化自由电子数) $n = N_{\text{ic}}/N_{\text{ia}} = 2.24$ 个。显然, n 值完全是 Fe 原子的电子组态可能和允许值(最外层 4s 上的 2 个电子和部分原子次外层 3d 上的部分电子),作为行星地球也是星系各种物态能量环境比较的可能和允许值。当然,地核超高压之下的原子组态还远未达到原子核外电子完全被公有化的白矮星高能状态,更未达到原子核外全部电子都被压入原子核内

的中子星极高能环境。

4. 地球自引力收缩能量足以提供形成地核特殊物态的能量。地球的自引力收缩能在地球的量子动力形成时达 $5.7 \times 10^{31} \text{ J}$ ^[16],与计算出的自引力超高压形成地核特殊物态的能量值 $3.75 \times 10^{30} \text{ J}$ 比较可知,地球的自引力收缩能量可以满足破坏地核物质原子的外壳层、形成特殊物质状态所需要的能量。

2 形成地球内核特殊物态的地球动力效应

在地球自引力作用下产生的超高压,对地核物质压缩做功,地核物质系统的总能量升高转变为从金属化到超固态的特殊物态。地核物质的能量升高最终是地核内公有化自由电子的动能增大。因此,超高压 P_g 压缩地核体积所做的功 dA ,可由地核特殊物态系统中自由电子气的总能量,即系统能量的总增量 dE_t 求出。

用 V 表示内地核物质在形成特殊物态前的体积时,在超高压作用下发生物态转变并产生内地核自由电子气的体积变化为 dv ,据功能原理地球自引力压缩地核物质做功可写为

$$dE = dA = -P_g dv。(11)$$

内地核系统自由电子气的总能量 E_{gas} ,即为自由电子费米能量值与电子总数之积,即

$$E_{\text{gas}} = NE_{\text{icF}} = (nN_{\text{ia}})E_{\text{icF}}(12)$$

其中, n 为每个内地核物质原子平均失去的电子数; N_{ia} 为内地核内物质原子的总数; E_{icF} 为内核自由电子气的电子费米能量。由(12)式及 Fe 原子半径 $r = 1.3 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ($V_{\text{Fe}} = (4/3)\pi r^3 = 9.20 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$)可计算得到 Fe 原子的费米能为

$$\begin{aligned} E_{(\text{Fe})\text{F}} &= \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} \times 9.20 \times 10^{-24} \right)^{2/3} \\ &= 8.3 \text{ eV}。 \end{aligned}$$

按照这一费米能计算,从内地核 $N_{\text{ic}} = 1.05 \times 10^{48}$ 个 Fe 原子上失去的电子,原来(在原子上)所具有的总能量 E_0 为

$$E_0 = E_{(\text{Fe})\text{F}} n N_{\text{ia}}。(13)$$

内核各个电子所增加的能量,等于其在地核中的费米能与其原来在原子上的费米能量之差,总的能量增量便是各个电子增加的能量与内核中电子总数之积。因此,由(12)、(13)式可得内核总能量的增量为

$$dE = E_{\text{gas}} - E_0 = nN_{\text{ia}}(E_{\text{icF}} - E_{(\text{Fe})\text{F}})(14)$$

或者

$$dE = N_{\text{ic}}(E_{\text{icF}} - E_{(\text{Fe})\text{F}})(15)$$

(15)代入(11)得

$$P_g = -[N_{ic}(E_{icF} - E_{(Fe)F})]/dv, \tag{16}$$

代入 N_{ic} 、 E_{icF} 、 $E_{(Fe)F}$ 等已知数值,并注意到 $dv=[4\pi(r^3-r_0^3)]/3$ 得

$$P_g = -k/(z-r_0^3), \tag{17}$$

或者

$$zP_g - P_g r_0^3 + k = 0, \tag{18}$$

其中: $k=7.46\times10^{36}$; $z=1.83\times10^{24}$ 均为常数。

分别取 Δr 若干可能的典型值,与(18)式计算得到的地球自引力压强 P_g 值,再据(7)式计算各相应的地核量子状态参数之后,共同列于表 1。

表 1 的数据变化表明,地球内核如果从最初半

表 1 地球自引力收缩演化过程各种参数典型值

内地核半径增量 $\Delta r/10^8\text{ cm}$ $\Delta r=r-r_0, r=1.222$	内地核初始半径 $r_0/10^8\text{ cm}$	内地核的平均自引力压强 P_g/GPa	内地核物质中公有化 自由电子总数 $N_{ic}/10^{48}\text{ 个}$	内地核物质原子 平均失去的电子数 $n/\text{个}$
0.00	1.222	328.9	—	—
— 0.10	1.322 ↓	1 537.0 ↑	7.50 ↓	7.17 ↓
— 0.20	1.422 ↓	709.5 ↑	5.87 ↓	5.61 ↓
— 0.30	1.522 ↓	438.3 ↑	5.39 ↓	5.15 ↓
— 0.40	1.622 ↓	305.3 ↑	5.29 ↓	5.06 ↓
— 0.45	1.672 ↓	261.7 ↑	5.25 ↓	5.02 ↓
— 0.50	1.722 ↓	227.2 ↑	5.26 ↑	5.03 ↑
— 0.55	1.772 ↓	199.4 ↑	5.31 ↑	5.07 ↑
— 0.60	1.822 ↓	176.5 ↑	5.36 ↑	5.12 ↑
— 0.70	1.922 ↓	141.3 ↑	5.51 ↑	5.27 ↑
— 0.90	2.122 ↓	96.4 ↑	5.89 ↑	5.63 ↑

径为 1 672 km(半径增长量为 450 km)压缩到目前内核半径 1 222 km 的体积改变量时,当时核幔边界的自引力压强为 261.7 GPa;在该点出现了内核初始半径 r_0 、自引力压强 P_g 分别单调递增、递减变化的同时,地核物质内的公有化自由电子总数 N_{ic} ,却反而出现了从上下 2 个方面向最小值收敛的情况。

这个临界点的存在表明,内地核在自引力收缩至半径 $r_0=1\ 672\text{ km}$ 处,很可能就是地球形成后期在地球内核自引力压强作用下,地核特殊物态量子效应开始出现的临界点。地球内核在此临界点开始出现量子效应直至收缩到某一半径临界值(小于内核现代半径 1 222 km)后,内核物质被压缩到极限,量子效应达极大并最终发生地球的整体膨胀。关于地球膨胀的一些情况,文献[17~28]已有多方面的论述,此不赘述。但是,不久前一项国内学者的研究成果,对于检验地球膨胀说具有特殊重要的意义。傅容珊及其项目组在一项完全独立的研究工作中[21],从完全不同的角度得出研究结论:在近几个百万年内,地球正在以 0.10 mm/a 的半径增长率膨胀。这与文献[27]中关于“地球半径的平均增长率为 0.4 mm/a,由于其膨胀演化的非线性特征,使得膨胀初期的半径增长率高达 1.08 mm/a,而演化到现代则减为 0.10 mm/a”的结论出乎意料地一致。

文献[19]的研究者充分肯定这项检验工作的可靠性,认为要推翻这个结论,只有拿出比 NUVEL-1 精度更高的板块运动模型之后,才有可能改变这个

结论^①。而根据 22 条板块边界上 1 122 个数据建立的现代板块运动模型 NUVEL-1,是目前由地学资料导出的最新一代板块运动模型,是迄今为止最为完善的现代板块运动模型。卫星激光测距在 5 个板块 12 个测站间测得的运动速率,与按照 NUVEL-1 模型计算得出的速率十分接近^[29]。因此,由 NUVEL-1 模型计算得出地球在最近几个百万年内正在膨胀的检验结果,有着空间大地测量高技术手段的间接支持。

根据文献[22,27]的研究,膨胀地球的初始半径为 $R_0=4\ 620\text{ km}$ (质量向心集中因子 $y_0=0.36$),原始地球膨胀至现代地球的半径增量为 $6\ 371-4\ 620=1\ 751\text{ km}$ 。因此,在 1 751 km 的半径总增量中,作为膨胀根本源区的地球内核半径增量为 522 km(仅占 29.8%)是完全可能的。下面据此讨论地球内核量子效应的地球动力问题。

将各已知值(其中 $dv=V_{ic}-(4\pi/3)(1.672\times10^8)^3=-1.194\times10^{25}$)代入(16)式得

$$P_g = 1.165\times10^{12}n. \tag{19}$$

又由(5)式及 $N_{ia}=nN_{ic}$ 、 $V=(4\pi/3)(1.672\times10^8)^3=1.96\times10^{24}$ 得

$$P_s=a[nN_{ia}/V]^{5/3}=1.778\times10^{12}(n)^{5/3}. \tag{20}$$

(19)、(20)式表明,内地核从初始半径 $r_0=1\ 672\text{ km}$

① 傅容珊. 板块运动与地球尺度变化. 中国科学院地球科学部“白垩纪地球整体事件研讨会”,北京,1998.

在自引力压强作用下被压缩至现代内地核半径的过程中,物质原子核外电子失去的个数 n 与自引力为线性函数关系。但是, n 与其所产生的量子压强值却并不与前一个函数关系有同样的线性关系,而是呈复杂的非线性关系。因此,在地核演化中,由于线性与非线性的该两函数必在某一临界点上相交。越过该临界点,内地核量子压强 P_s 大于内地核的自引力压强 P_g 而发生地球整体膨胀。

由(19)、(20)式可得地核由自引力收缩到量子压强排斥引起地球膨胀之临界点处 $n(n=6.55)$ 与 $P(P=730\text{ GPa})$ 的值。

当地核内特殊物态平均公有化电子数 $n<6.55$ 个时, $P_s(r)<P_g(r)$, 简并电子气所产生的量子压强还不足以打破(8)式反映的平衡态而发生地球整体膨胀,地球内部物质仍然在自引力作用下继续收缩,地核的物质状态发生转变,量子压强随着超固态的形成而产生并逐渐增大,一旦地球的自引力压强使内地核达到公有化电子数 $n\geq 6.55$ 、自引力压强 $P_g\geq 730\text{ GPa}$ 的临界数值后,由于其能量的量子化本质特征,地核内的量子压强便骤然跃升超过地球的自引力压强,突破了与自引力压强平衡的临界值,这时 $P_s(r)>P_g(r)$, 地球开始向自引力收缩的相反方向演化——地球的整体膨胀演化。这就是为什么地核内部未能持续保持稳定的平衡态,却发生了破坏平衡态向自引力收缩相反方向演化的根本原因。换句话说,打破地球收缩的自引力与量子斥力平衡状态的根本力量,来自于地核特殊物态能量的量子化本质特征。由于产生地球整体膨胀的这种地球构造动力,直接地决定于地核特殊物态的量子效应,因此,这种地球构造动力可称为量子地球构造动力,或简称量子地球动力。

3 结语

地球演化过程中的自引力收缩能量 $5.7\times 10^{31}\text{ J}$, 能够满足形成地核特殊物态——超固态所需要的能量 $3.57\times 10^{30}\text{ J}$ 这一结果不是一种偶然,而是地球核部特殊物质状态及其相应地球动力的一个证明。作者通过量子地球动力与地球自引力平衡的途径,计算得到地球物质原子失去电子的平均数,是 Fe 原子外层电子组态的可能和允许值也不应是偶然的巧合,而是地球核部特殊物质状态及其相应地球动力的又一相对独立的佐证。

作者的研究探讨和计算多是初步与近似的,许多诸如量子地球动力更为具体的发生机制与过程、

原始地球核部达到平衡临界电子数和临界自引力压强情况的估算、地球量子动力形成和演化与太阳系类地行星演化过程的一致性及其在地球行星上出现的特殊性等问题,都还有待于进一步的分析计算。

参考文献:

[1] Ramsey W H. On the nature of the Earth's core[J]. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., 1949, (5).

[2] 马格尼茨基 B A. 大地物理学[M]. 周梦麟 译. 北京:地质出版社, 1956.

[3] Amoros J L, Sam A. Miguol[J]. Tectonophysics, 1968, 5(4).

[4] 卡普斯钦斯基 A Ф. 关于地球的理论[A]. 谢尔巴科夫. 地球化学与矿物学问题[C]. 王文斌 译. 北京:科学出版社, 1958.

[5] 卡普斯钦斯基 A Ф. 地圈和原子的化学性质[A]. 卡普钦斯基, 维诺格拉多夫. 地球化学专辑第二辑[C]. 余崇文 译. 北京:地质出版社, 1957.

[6] 南京大学地质系. 地球化学(修订本)[M]. 北京:科学出版社, 1979.

[7] 陈光旨. 物态[M]. 北京:科学出版社, 1985.

[8] Mao H K, Hemley R J. Optical studies of Hydrogen above 200 gigapascals; evidence for metallization by band overlap[J]. Science, 1989, 244: 1462—1465.

[9] Metz M D. Metallic Hydrogen; simulatory jupiter in the laboratory[J]. Science, 1973, 180: 398—399.

[10] 林忠一郎, 早川幸男. 宇宙物理学[M]. 师华 译. 冯克嘉, 李启斌校. 北京:科学出版社, 1981.

[11] 埃斯伯格 R, 瑞斯尼克 R. 量子物理学(上册)[M]. 吴伯泽 译. 北京:北京工学院出版社, 1985.

[12] 曾谨言. 量子力学[M]. 北京:科学出版社, 1981.

[13] 张礼. 近代物理学进展[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.

[14] Wang C Y. Density and constitution of mantle[J]. J. Geophys. Res., 1970, 75.

[15] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, (3).

[16] 戴文赛, 胡中为, 阎林山, 等. 太阳系演化化学(下)[M]. 上海:上海科技出版社, 1986.

[17] 王鸿祯. 全球构造研究的简要回顾[J]. 地学前缘, 1995, 2(1—2).

[18] Wang Hongzhen, li X, Mei S, et al. Pangaea cycles, Earth's rhythms, and possible Earth expansion[A]. In: Wang Hongzhen. Origin and History of the Earth[C]. Holand: Proc 30th IGC, 1996.

[19] 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3).

[20] Owen H G. Has the earth increased in size ? [A]. In: Chatterjee S, Hutton N. New Concepts in Global Tectonics[C]. Lubbock, USA: Tex Univ Press, 1992.

[21] 傅容珊, 黄建华, 李力刚. 地球在膨胀吗? [A]. 中国地球物理学会年刊[C]. 西安:西安地图出版社, 1998.

[22] 陈志耕. 膨胀地球大地构造作用机制初探[A]. 中国力学会, 中国地球物理学会, 中国地震学会. 中国学术会议文献通报: 全国第三届地球构造动力学术会议论文集[C]. 北京:中国科学技

