

本文框架内容发表在:

阎坤. 60年来大气中二氧化碳浓度数据的趋势方程研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1665~1670.

YAN Kun. Research on tendency equation about the concentration data of carbon dioxide in the atmosphere over the past 60 years[J]. Progress in Geophys. (in Chinese with abstract in English), 2009, 24(5): 1665~1670, DOI:10.3969/j.issn.1004 2903. 2009. 05. 016.

60年来大气中二氧化碳浓度数据的趋势方程研究

阎坤

(西安现代非线性科学应用研究所 西安 710061)

摘要: 通过讨论已有的60年来大气中CO₂浓度数据的分布状态, 采用趋势分析方法, 给出了具体趋势方程形式。与冰芯分析或观测数据对比结果表明, 趋势方程曲线与已有数据基本符合, 随后初步给出了2010年至2016年间大气中CO₂浓度预测值。

关键词: 二氧化碳浓度, 大气, 趋势方程, 曲线拟合, 预测值, 数据分析

Research on tendency equation about the concentration data of carbon dioxide in the atmosphere over the past 60 years

YAN Kun

(Xi'an Modern Nonlinear Science Applying Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract In this paper, by discussing the existing distribution of the CO₂ concentration data in the atmosphere over the past 60 years, and adopting the tendency analytical method, the concrete tendency equation forms of the CO₂ concentration are presented at first. Further more, the comparison result between the curve of the theoretical equation and the data curve of CO₂ concentration from the ice cores analysis or the observation is given. The result shows that the tendency equation curve agree well with the existing data. Subsequently, the predictive data of the CO₂ concentration in the atmosphere during the year from 2010 to 2016 are suggested tentatively.

Keywords concentration of carbon dioxide, atmosphere, tendency equation, curve fitting, predictive data, data analysis

0 引言

大气中CO₂浓度是研究全球气候变迁的重要参量之一, 已有文献给出了由冰芯分析数据及观测数据获得的大气中CO₂浓度资料, 并进行了相关分析阐述^[1~4]。

本文基于其中大气中CO₂浓度变化数据^[1~3], 采用趋势分析方法^[5], 给出60年来CO₂浓度数据的趋势性拟合方程, 并进而对2010年至2016年的大气中CO₂浓度初步给出预测值, 是为进一步的分析研究提供参考。

1 大气中二氧化碳浓度数据的趋势方程形式

趋势分析方法主要是对于已有物理学原理尚未完全覆盖的研究现象, 基于历史数据, 从数学角度对现象的部分参量关系予以初步的、轮廓层面的趋势性描述^[5]。

1.1 大气中二氧化碳浓度数据的趋势分析

对于大气中CO₂浓度数据的趋势研究, 分析步骤为:

首先通过已有文献^[1~3]给出1948年至2008年这60年来大气中CO₂浓度数据与年份的条带坐标数据关系;

其次给出CO₂浓度中线一年份的坐标数据如图一所示(此组数据还有待更全面的数值分析予以补充);

然后进行CO₂浓度 c 与年份 y 的拟合方程分析

$$\sum_{i=1}^j a_i \frac{d^i Q}{d y^i} = f(Q, y), \quad (1)$$

其中

$$Q = \kappa(c - c_0)\phi^{-1}, \quad \phi = 1 - \exp(-\varepsilon(y - y_0)); \quad (2)$$

Q 及 κ 分别为简化方程运算所引入的释放函数及平衡

系数, ε 为衰减系数; y_0 及 c_0 分别为分析起始年份及相应浓度值 (1948 年, 310ppmv); 一般取 a_i 为待定常数、 $j = 2$ 、 $f(Q, y)$ 为 Q 与 y 的多项式或周期性函数。基于图一中的数据, 考虑 ϕ 为 Taylor 级数一阶展开形式

$$\phi = \varepsilon(y - y_0), \quad \varepsilon(y - y_0) \ll 1 \quad (3)$$

进一步地, 取方程 (2) 式中的平衡系数 $\kappa = \varepsilon$, 有

$$Q = \varepsilon(c - c_0)\phi^{-1} = (c - c_0)(y - y_0)^{-1}; \quad (4)$$

则通过对 CO₂ 浓度数据与年份关系的拟合分析处理, 即可初步给出 Q 与 y 之间趋势分布诸多关系式中的一简略具体方程形式为

$$\frac{d^2 Q}{dy^2} + \sigma_1 Q + \sigma_2 = 0, \quad y > y_0 \quad (5)$$

这里待定常数 $\sigma_1 = 1.00 \times 10^{-4}$, $\sigma_2 = -1.34 \times 10^{-4}$ 。

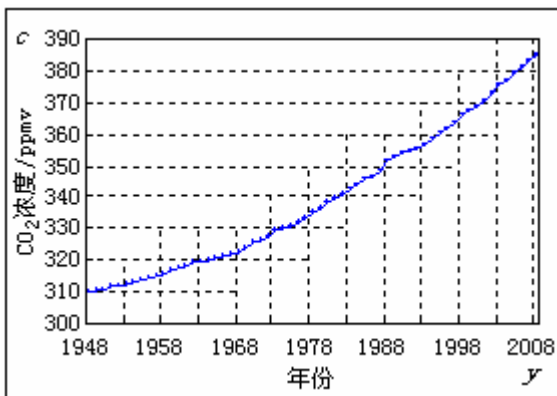


图1 60年来大气中 CO₂ 浓度数据曲线 (基于文献[1~3])
Fig. 1 Curve of the CO₂ concentration data in the atmosphere over the past 60 years (based on the references from 1 to 3)

1.2 大气中 CO₂ 浓度趋势方程及与观测数据的对比结果

求解方程 (5) 式, 即可得其解为

$$Q = 1.34(1 - \cos(0.01(y - 1948) + 0.9)), \quad y > 1948 \quad (6)$$

故得 60 年来大气中 CO₂ 浓度数据的趋势方程为

$$c = 1.34(y - 1948) \times (1 - \cos(0.01(y - 1948) + 0.9)) + 310, \quad y \geq 1948 \quad (7)$$

由方程 (7) 式得在 1948 年至 2008 年间大气中 CO₂ 浓度曲线与图一数据曲线的对比结果如图二所示。

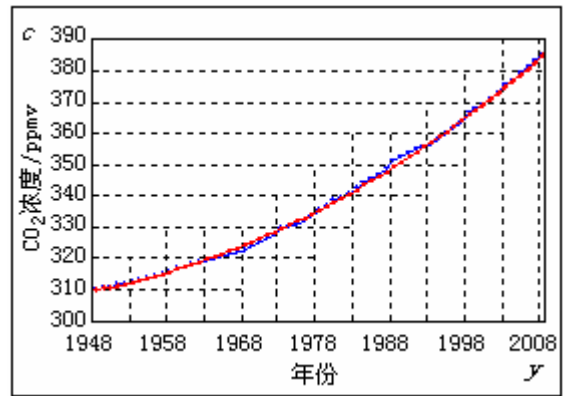


图2 趋势方程曲线与观测数据曲线的对比结果图

— 冰芯分析或观测数据曲线 (基于文献[1~3])
— 趋势方程曲线

Fig. 2 The comparison result figure between the curve of tendency equation and the curve of existing data of the CO₂ concentration in the atmosphere over the past 60 years

— curve of data from the ice cores analysis or observation (based on the references from 1 to 3)
— curve of the tendency equation

在从 1832 年至 1948 年间, 文献^[1~3]表明在其中的 1937 年至 1948 年大气中 CO₂ 浓度数据基本维持在同一数值 310ppmv 附近, 即

$$c_{1937 \sim 1948} \approx 310 \text{ ppmv}, \quad 1937 \leq y \leq 1948$$

而在此前从 1832 年到 1937 年间, 变化亦较缓慢; 参照上述方法得此期间大气中 CO₂ 浓度的趋势方程为

$$c_{1832 \sim 1937} = 0.21(y - 1832) \times (1 - \cos(0.01(y - 1832) + 0.7)) + 284.3, \quad 1832 \leq y \leq 1937 \quad (8)$$

方程 (7)、(8) 二式具有相同的峰值周期

$$T = 200\pi.$$

方程 (8) 式计算曲线与冰芯分析数据的对比结果如图三中 1832 年至 1937 年间区域所示。

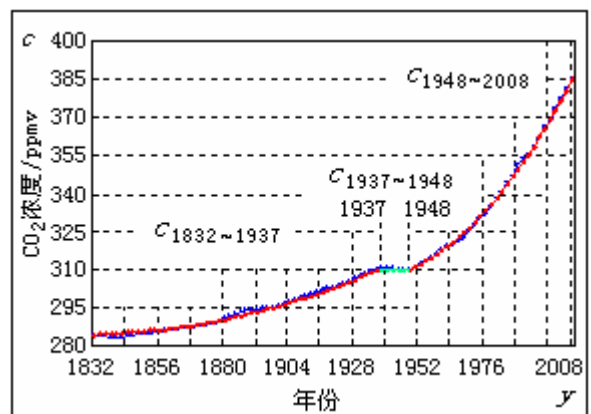


图3 1832 年至 1937 年趋势方程曲线与已有数据曲线 (基于文献[1~3]) 的对比结果图

Fig. 3 The comparison result figure between the curve of tendency equation and the curve of existing data (based on the references from 1 to 3) of the CO₂ concentration in the atmosphere during the year from 1832 to 1937

上述图二中的对比结果表明, 在从 1948 年至 2008 年这 60 年来大气中 CO₂ 浓度的趋势方程与已有数据基本符合; 其中较大相对误差出现在 1968 年 (0.60%) 及 1988 年 (-0.62%)。在图三中从 1832 年至 1937 年间, 趋势方程曲线与已有数据曲线对比较大相对误差出现在 1842 年 (0.40%) 及 1890 年 (-0.51%)。

2 大气中二氧化碳浓度的趋势预测

2.1 趋势分析方程的趋势性预测值

依据方程 (7) 式得在 1950 年至 2100 年间大气中 CO₂ 浓度趋势曲线如图四所示。

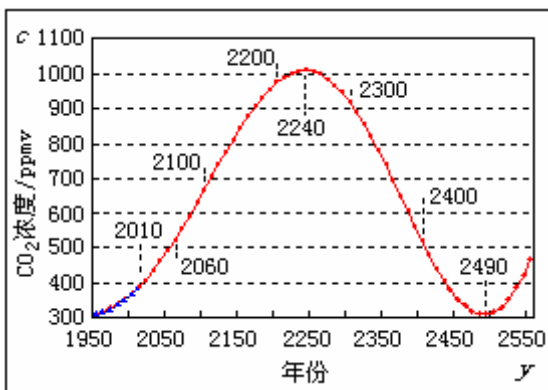


图 4 在 1950 年至 2100 年间大气中 CO₂ 浓度的趋势方程曲线
Fig. 4 Tendency equation curve of the CO₂ concentration in the atmosphere during the year from 1950 to 2100

其中在 2010 年至 2060 年的预测值如表一所示。

表 1 2010 年至 2060 年大气中二氧化碳浓度预测值(ppmv)
Table 1 Predictive data (ppmv) of the carbon dioxide concentration in the atmosphere during the year from 2010 to 2060

年 份	2011	2012	2013	2014	2015	2016
预测值	391	393	395	397	400	402
年 份	2010	2020	2030	2040	2050	2060
预测值	389	411	436	464	493	525

进一步地, 通过对大气中 CO₂ 浓度更全面的数据分析, 求出衰减系数 ε , 确立更精准的趋势方程, 为长程时间尺度的描述奠定基础, 为碳排放量控制提供参考数据, 为深入了解大气中 CO₂ 浓度变化与气候变迁的强相关或弱相关联系提供研究支撑。

对于大气中 CO₂ 浓度 (ppmv) 与含碳量 (kg) 的转换, 当取 CO₂ 分子量为 44、C 原子量为 12、大气平均分子量约为 29、大气总质量约为 5.13×10^{18} kg 时, 依据 Avogadro 定律, 则有

$$\begin{aligned} 1\text{ppmv}(\text{CO}_2) &= \frac{44}{29} \times 10^{-6} \times \frac{12}{44} \times 5.13 \times 10^{18} \\ &= 2.12 \times 10^{12} \text{ kg}(\text{C}) \end{aligned}$$

2.2 趋势分析方程的局限性

由图四可见, 大气中 CO₂ 浓度在趋势上呈现出以数百年为时间尺度的周期变化轨迹。但方程 (7) 式仅是基于从 1948 年至 2008 年这 60 年来的 CO₂ 浓度数据作趋势性拟合分析得到的结果, 故其周期解亦是趋势性质的。

由于从冰芯分析推算出的大气中 CO₂ 浓度数据还需要从其它研究途径获得确认, 且全球能源结构处在持续调整中, 包括碳排放量的控制及固碳技术的提高, 所以上述分析给出的方程是较为初步的形式, 其中在 2010 年至 2060 年间大气中 CO₂ 浓度的预测值 (如表一所示) 是趋势性的, 而在 2100 年之后的趋势曲线 (如图四所示) 则已渐失参照意义, 在长程远景的真实情况尚所知甚少, 仍有待深入研究予以描述。

依据方程 (2)、(6) 二式, 方程 (7) 式的一般形式可表示为

$$\begin{aligned} c &= A(1 - \exp(-\varepsilon(y - y_0))) \\ &\times (1 - \cos(\omega(y - y_0) + \theta)) + c_0, \quad y \geq y_0 \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $A = \kappa^{-1} A_0$, A_0 、 ω 、 θ 为幅值、圆频率、初相位。

对于较长程时间尺度层面上的大气中 CO₂ 浓度变化, 方程 (3) 式不再成立, 局部波动或短期尖峰会作为毛刺被平均或平滑处理, 继而方程 (2) 式将为

$$\begin{aligned} Q &= \kappa(c - c_0), \quad \phi = 1; \\ \exp(-\varepsilon(y - y_0)) &\approx 0, \quad \varepsilon(y - y_0) \gg 1 \quad (10) \end{aligned}$$

方程 (9) 式成为

$$c = A(1 - \cos(\omega(y - y_0))) + c_0, \quad \theta = 0 \quad (11)$$

在更长程时间, 方程 (1) 式将在相应尺度层面上呈现具体形式, 其解诸如为叠加的周期波。

相对于以基本原理为基础的解析理论, 趋势分析方法虽然较为灵活且易于变通, 但由于缺少机理层面的描述, 研究过程易包含或掺杂着先验毛估、混合拼凑、试探推究的成分, 方程形式及其中的待定系数对历史数据及相邻尺度层面状态具有较强的依赖性, 故其基本属于前期探索方法, 偏于数学技巧或数据处理方式, 是权宜研究途径, 不属于经典解析方法, 不具有原理层面的基础意义及普适性, 不宜作长程预测及跨层面分析。

3 大气中CO₂浓度数据趋势研究的初步展望

大气中 CO₂ 浓度数据在以从天到年、从百年到十万年、百万年等为分析区间时的平均中线、包络线是复杂的, 在趋势上具有相应尺度的周期性, 各层面的变化既相互关联, 又有相对独立性, 其中在大尺度层面上的变化规律统驭着在较小尺度层面上的变化规律。

3.1 趋势分析方法的一般简单性原则

在对自然现象的分析途径方面, 目前主要有三个方向, 一是采用基本原理的解析方法, 二是采用基本原理与经验方程相结合的方法, 三是采用趋势分析方法。对于基本原理尚未完全覆盖的现象, 通过对现象演化数据的趋势性分析, 给出趋势拟合方程, 可为进一步建立以基本原理为基础的解析理论体系提供前期铺垫及参照。

由趋势分析方程 (1) 式, 可得其一类简单形式为

$$\frac{d^m z}{dx^m} + \sigma_1 z^n + \sigma_2 = 0, \quad (12)$$

式中 m 、 n 为自然数, σ_1 、 σ_2 为待定系数。

方程 (12) 式的解涵盖线性函数、三角函数、自然指数函数及双曲正切函数等诸多形式, 故得趋势分析方法的一般简单性原则为:

- (1) 局部线性函数的简洁性;
- (2) 区间三角函数的周期性;
- (3) 过渡自然指数函数的经典性。

上述原则意在表明, 对于规整空间的现象界参量, 局部小尺度的变化趋势宜优先考虑作线性化处理;

$$z - z_0 = -\sigma_2(x - x_0), \quad m = 1, \sigma_1 = 0 \quad (13)$$

式中 x_0 、 z_0 为 x 、 z 的分析初始值。

在重点分析区间宜尽可能包含或兼顾相应尺度上的成长衰落变化趋势、或现象参量演化的极限特征;

$$z - z_0 = A \sin[\sqrt{\sigma_1}(x - x_0)], \quad m = 2, n = 1, \sigma_1 > 0 \quad (14)$$

$$z = A \tan[\sqrt{\sigma_1 \sigma_2}(x - x_0)], \quad m = 1, n = 2, \sigma_1 \sigma_2 > 0 \quad (15)$$

在突变或阶跃区域、乃至涉及到相邻层面上的变化影响时, 包括从一相对稳态到另一相对稳态的变化、孤波、窗函数等, 宜优先考虑自然指数函数、双曲正

切函数 (包括其变形方程) 的经典性;

$$z - z_0 = A[1 - \exp(-\sigma_1(x - x_0))], \quad m = 1, n = 1, \sigma_1 \neq 0 \quad (16)$$

$$z = A \tanh[\sqrt{-\sigma_1 \sigma_2}(x - x_0)], \quad m = 1, n = 2, \sigma_1 \sigma_2 < 0 \quad (17)$$

上述方程在局部区域

$$\text{abs}(\alpha(x - x_0)) \ll 1$$

时相对 (13) 式皆有

$$z - z_0 = \alpha A(x - x_0) = k(x - x_0), \quad k = \alpha A \quad (18)$$

针对所分析现象参量数据的分布状态特征, 运用上述函数 (包括但不限于) 的组合以及嵌套形式, 可以较为明晰简洁地在趋势层面上描述参量稍许复杂的演化过程, 尤其是非线性演化过程, 包括脉冲、阶梯、延滞及超进等; 诸如单脉冲、系列脉冲、饱和延滞回线及超进回线 (如饱和磁滞及反常饱和磁滞回线包络类) 方程的等效或近似形式分别为

$$z - z_0 = A[\tanh(\alpha_1(x - x_{01})) - \tanh(\alpha_2(x - x_{02}))], \quad \alpha_1 \alpha_2 > 0 \quad (19)$$

$$z - z_0 = A \tanh[\alpha \sin(\beta(x - x_0))], \quad (20)$$

$$z = z_s \tanh[\alpha(x - \eta x_C)], \quad \alpha > 0 \quad (21)$$

$$z = z_s \tanh[\alpha(x + \eta x_E)], \quad \alpha > 0 \quad (22)$$

这里 z_s 为饱和生成强度特征值, x_C 、 x_E 分别为矫顽力、平衡力, $\eta = |\Delta x|(\Delta x)^{-1}$ 为方向系数, α 、 α_1 、 α_2 、 x_{01} 、 x_{02} 、 β 皆为待定系数。

上述饱和延滞、超进回线方程是对极限状态的等效包络描述, 而对于一般的延滞、超进回线, 则宜应用方程 (21)、(22) 二式的变形形式予以等效或近似描述

$$z = \frac{z_{p1} \eta \exp(\alpha_1(x - x_{C0})) - z_{p2} \eta \exp(-\alpha_2(x - x_{C0}))}{z_{p3} \exp(\alpha_3(x - x_{C0})) + z_{p4} \exp(-\alpha_4(x - x_{C0}))}, \quad (23)$$

$$z = \frac{z_{p1} \eta \exp(\alpha_1(x + x_{E0})) - z_{p2} \eta \exp(-\alpha_2(x + x_{E0}))}{z_{p3} \exp(\alpha_3(x + x_{E0})) + z_{p4} \exp(-\alpha_4(x + x_{E0}))}, \quad (24)$$

这里 z_{pi} 、 x_{C0} 、 x_{E0} 、 α_i 为待定系数, i 为自然数 ($i = 1$ to 4)

方程 (23)、(24) 二式所予以等效或近似描述的和参量演化过程及方向密切相关的性质, 是自然现象演化的较为一般的特征, 其阶梯性 (包括局部复合阶

梯度)、逆向移相及波形相似对称翻转等性质仍需要作进一步深入研究, 其亦将对自然界更为广泛现象的认识, 尤其是对类如气候演化过程的机理刻画及趋势性描述具有基础意义。

3.2 二氧化碳浓度趋势值预测区间

依据上述阐释, 在对大气中 CO_2 浓度变化规律进行研究时, 可将大尺度层面的变化作线性、乃至常数等效, 将更小尺度层面上的变化作平均、乃至质点化等效, 进而着重分析在相应适宜时间尺度上的趋势性变化规律。

对于初步得到的分析结果, 在向二边延伸作数值预测时, 一般宜控制在原分析尺度区域量的三分之一以内。

上述表一中给出的在 2020 年至 2060 年间大气中 CO_2 浓度的趋势预测值仅具有参考意义。

通过对部分现象演化历史及趋势的研究描述, 能够更深刻地理解自然演化的内禀性质, 并进而透过表象自然生成更为一般性的途径方法及普适思想, 乃至无碍于现象及认识的生成演化及衰落湮灭。

在近于根本上, 没有规律或描述能支配或制约现象, 只是现象演化呈现出从显著至微弱的趋势。未来依赖于过去及现在, 但未来含摄着无限的创造, 未来更有其本具的特征。未来将有未来的景象, 未来是由未来决定的。

3.3 气候变迁与二氧化碳浓度变化

地球气候变迁涉及因素众多, 部分因素间存在反馈激励机制, 其演化是多层面物质、能量、信息传递、转化、及动态平衡过程。大气中 CO_2 浓度变化与气候变迁相互作用, 在显著变化时于表观上呈现出超前、近于同步、滞后的模式, 有时还会不显著相关。

在较长程远景时间尺度上, 对气候变迁及大气中 CO_2 浓度变化的分析研究首先宜考虑日一地一月系统, 其次考虑地球子系统, 复次考虑人类活动的影响。

地球在形成时其存在状态即处在与周围星体的相互联系中, 地球公转产生于太阳自旋转所携带背景介质的直接作用及能量密度的趋同效应; 地球自转方向、远日距离作周期性变化、且相互影响, 全球板块运动依赖于地球的自转状态, 趋向两极作周期性聚合离散漂移运动, 使得地球形状、表面物质分布状态及地表年平均温度亦随之发生周期性变化。在更长程尺度上的一初步推论为, 地球公转、自转及全球板块运动处

在逐层面关联耦合中, 地球环境即与地球公转轨道参数波动、自转轴乃至自转方向变化、全球板块运动等密切相关; 地球目前处在从距今 65Ma 前(白垩纪末)开始的远日距离增加过程, 地表年平均温度由暖逐渐转冷, 至距今 190Ma 后, 地球自转周期将等于公转周期, 随后渐近停止自转, 继而自转方向改变, 远日距离开始缩短, 地球又进入逐渐转暖过程, 连成一体, 的大陆将由现在的北半球附近渐次分离形成新的板块, 经由赤道向现在的南半球附近区域漂移集聚(深入研究或将表明这一振荡周期从 4000Ma 前(冥古宙)的 800Ma 减少至从 570Ma 前(远古宙震旦纪)到现在的 510Ma); 在此过程, 地球状态及气候与太阳系在银河系中公转轨道位置及周期性地出离回归银臂、银道面密切相关。

在日一地一月系统中, 太阳在太阳系形成之前即已具形了, 而地球则相对有缓慢形成过程; 太阳状态的微小变化即可引起地球环境的显著变化及一系列相关效应, 在地球气候状态动力学方程上表现为方程的强迫激励函数项。而由太阳及地球的状态变化在月球上引起的反应, 将在地一月这一子系统中产生自激, 形成地球气候状态动力学方程中由月球施加的自激函数项。

对于地球, 在太阳及月球激励下, 通过地球与气候相关的参量(诸如海洋与大气(直接)、板块与地貌、冰川与冻土、生物与环境等), 引起气候及 CO_2 浓度变化。在小尺度范围可将激励项作周期函数、线性函数、乃至常数等效处理, 地球气候状态将处在相应激励下作强迫振荡及固有自由振荡的叠加模式中。

地球运行于星际中, 地球上部分生物的起源远比太阳系的诞生更为古老久远。但地球生物属于地球系统构成部分, 主要在地球状态激励下处于周期性受迫演化过程(尤其在形态方面), 其活动与地球环境相互影响并标记。诸如碳同位素重值期、大洋储碳受驱机制(多重驱动)、周期及对冰期旋回[6, 7]。对于人类活动, 其时间相对于地球系统的大尺度时间较为短暂, 但其活动(如碳排放)亦在改变着气候及 CO_2 浓度的自然演化过程, 扰动了原有的碳循环、碳平衡状态, 而且在一定尺度内积累形成短期内不可逆转的宏观效应。

在根本上, 地球有其固有的碳平衡运转周期及约束机制(激发或抑制), 在一定范围内甚至可忽略包括其构成及附属部分的活动影响, 或将通过伴生效应强

制约束并改变其构成部分的内在结构属性及分离对其依赖性。

在大气中 CO₂ 浓度与气候关系方面, 气候的变迁由多种因素共同作用形成, 大气中 CO₂ 浓度变化是其中一个因素。大气中 CO₂ 浓度在一定范围内变化未必随即导致气候变迁, 需要与其它因素联同作用, 并通过积累过程以达到触发阈值; 而气候的变迁导致大气中 CO₂ 浓度的变化过程则有时更为直接, 其机理亦复如是。

对地球状态及气候研究, 宜将银河系、太阳系、地月系统逐层分析综合探索, 长程通览、短程细化。

4 结 论

本文基于已有的在 1948 年至 2008 年间 60 年来大气中 CO₂ 浓度数据分布状态, 通过趋势分析方法, 给出具体趋势方程形式, 与已有数据对比的结果表明, 趋势方程曲线与观测数据基本符合, 进而初步给出了 2010 年至 2016 年间大气中 CO₂ 浓度趋势性预测值, 供深入研究时参考。

对大气中 CO₂ 浓度数据的观测分析和趋势研究, 为深入认识全球气候状态、调整能源结构提供基础信息, 为进一步描述环境演化提供基础资料。对地球环境演化内涵的理解, 目前尚处在起点附近; 对于多重时间尺度上大气中 CO₂ 浓度的规律研究, 还有一段至为艰难的探索旅程。

参考文献 (References):

[1] Pieter Tans. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Global[R]. NOAA/ESRL. 2009.
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

- [2] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3):345~358.
Jiang Zemin. Reflection on energy issues in China[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (in Chinese with abstract in English), 2008, 42(3):345~358.
- [3] Etheridge DM, Steele LP, *et al.* Historical CO₂ record derived from a spline fit (20 year cutoff) of the Law Dome DE08 and DE08-2 ice cores[R]. 1998.
<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr20>
- [4] 王安建, 王高尚, 等著. 能源与国家经济发展[M]. 北京: 地质出版社, 2008, 100~114.
Wang Anjian, Wang Gaoshang, *et al.* Energy and economic development of countries[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese), 2008, 100~114.
- [5] 阎坤. 地球空间稳定核素的趋势分析方程与物质的超光速运动规律[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1):38~47.
Yan Kun. The tendency analytical equations of stable nuclides and the superluminal velocity motion laws of matter in geospace[J]. Progress in Geophysics (in Chinese with abstract in English), 2006, 21(1):38~47.
<http://www.nature.ac.cn/papers/paper-pdf/vacuumenergy-pdf.pdf>
- [6] 李建如, 汪品先. 南海20万年来的碳同位素记录[J]. 科学通报, 2006, 51(12):1482~1486.
Li Jianru, Wang Pinxian. A 200-ka carbon isotope record from the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, Science in China Press, 2006, 51(14):1780~1784.
- [7] 翦知霭, 金海燕. 大洋碳循环与气候演变的热带驱动[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3):221~227.
Jian Zhimin, Jin Haiyan. Ocean Carbon Cycle and Tropical Forcing of Climate Evolution[J]. Advances in Earth Science (in Chinese with abstract in English), 2008, 23(3):221~227.