

全球增暖的另一可能原因初探^{*}

李崇银¹⁾ 翁衡毅¹⁾ 高晓清²⁾ 钟 敏³⁾

1) (中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

2) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

3) (中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077)

摘 要 太阳是地球流体(大气和海洋等)运动的最终能量源, 地球环境, 尤其是气候的变化不能不与太阳活动有关。目前, 普遍将全球增暖归结为温室气体含量增加所导致的温室效应的加剧, 这无疑是有一定依据和有道理的。但从科学上来讲, 人类活动所引起温室气体增加的影响, 并非是唯一原因。基于已有的一些研究结果, 从太阳活动的观点所进行的初步分析表明, 太阳活动也可能是引起近世纪全球增暖的另一个重要原因。太阳活动的影响主要包括太阳辐射的直接影响和引发地磁场变化的间接影响两个方面, 地球磁场的变化将可通过动力过程和热力过程而影响大气环流和气候的变化。

关键词: 全球增暖; 温室气体; 太阳活动; 地球磁场的变化

1 引言

全球增暖, 以及由此而带来的全球环境变化问题已引起全世界人们及各国政府的严重关切, 自然也引起了科学界, 尤其是地球科学界的高度重视。自上世纪 80 年代以来, 已开展了一系列的研究, 并取得了初步的结果。

首先, 通过对一系列观测资料的分析研究表明, 最近 100 年来, 全球平均地面空气温度已增高了约 0.65°C , 全球增暖成为无争的事实^[1~3]; 而且, 上个世纪的全球平均增温率之大也是历史上所没有的^[4]。

是什么原因导致了上世纪全球气温的显著增加呢? 基于一些资料分析和数值模拟试验的结果, 目前人们较为普遍地认为, 工业化革命以来温室气体排放增加所导致的温室效应的加剧是全球增暖的根本原因^[5, 6]。这一结论的主要依据有两个方面, 其一是冰芯记录表明 16 万年以来大气中 CO_2 浓度的变化与气温的变化有很好的正相关关系, CO_2 浓度高的时期, 气温就偏高; 反之亦然。因此也就认为, 工业革命以来全球大气中以 CO_2 为主的温室气体的浓度迅速增加, 是它导致了全球的明显增暖。其二是用气候数值模式所作的模拟清楚地表明, CO_2 浓度增加(包括 CO_2 加倍)所引起的辐射强迫可以导致模式大气(对流层)温度的明显增加; 而且以高纬度地区的增温最为显著。但是, 也有一些科学家有不同的观点, 认为近 100 年来的全球增暖虽然有温室气体增加

2003-02-17 收到, 2003-03-04 收到修改稿

^{*} 中国科学院知识创新项目 ZKCX2-SW-210、ZKCX2-203 和国家重点基础研究发展规划项目 G1998040903 共同资助

的影响，也是全球气温自然变化过程中的现象。其论点主要有两个：一是在古气候的演变中显然存在着冰期（寒冷）和间冰期（温暖）的交替^[7~9]，上世纪以来的增暖也可能只是间冰期中的一种自然现象；而且过去的记录表明，CO₂浓度增加并非发生在增温之前^[10]。其二是云和辐射间的反馈作用对温室气体所造成的增温有一定的抑制作用^[11, 12]，尽管已有一些数值模拟认为其影响较小，但并不能否定这种作用。

因此，上世纪以来的全球增暖的确是事实，温室气体含量增加也的确可以引起气温升高。但温室效应的加剧是否是导致全球增暖的唯一原因，还有待从不同角度深入研究。下面我们将基于一些已有的研究结果，进一步从太阳活动的角度综合分析全球增暖问题，因为全球大气和海洋等流体运动的最基本能量来自太阳，太阳活动无疑将影响大气和海洋的状态和运动，也必然对气温变化造成影响。

2 辐射强迫估计不确定性的分析

关于温室气体含量增加引起全球增暖的结论主要来自模式对各种强迫因子所引起的辐射强迫的估计和计算，但这种估计本身还存在相当大的不确定性，IPCC 的 1996 年和 2001 年报告也都指出了这个问题。这里我们引用 IPCC 的 2001 年报告中的一张图（图 1），它显示了各种因子所引起的全球平均辐射强迫的估计。图中既给出了各种因子所造成的辐射强迫的估计量，同时在其下方还分别给出了估计量的可信度等级。可以看到温室气体（CO₂、CH₄、N₂O 和 卤烃）、对流层臭氧、气溶胶和太阳活动是几个最重要的强迫因子（辐射强迫大于 0.3 W m⁻²）。这些因子中温室气体的辐射强迫达到 2.4 W m⁻²，而且可信度的等级高；对流层臭氧的辐射强迫为 0.5 W m⁻²左右，可信度等级为中等；对流层气溶胶的直接影响存在各过程相互抵消的作用，实值不大，可信

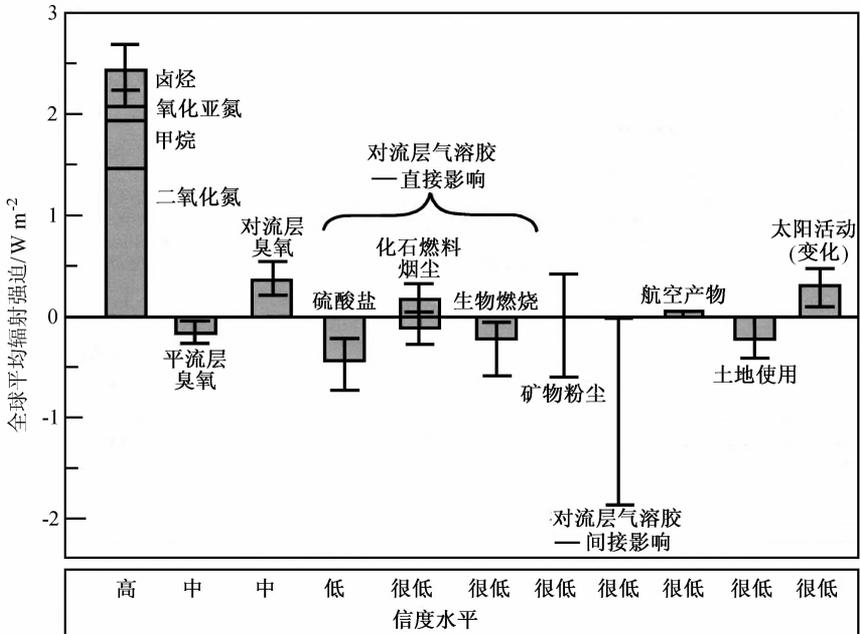


图 1 各种因子所造成的辐射强迫的估计以及这些估计的可信度等级（引自文献 [6]）

度又非常低；对流层气溶胶的间接影响十分不确定，辐射强迫在 $0 \sim 2.0 \text{ W m}^{-2}$ 之间，可信度也非常低。可信度非常低，意味着目前我们还不知道其辐射强迫的影响实际是多少，现有的估计并不很可靠。

在上述估计中如果对流层气溶胶的间接影响（负）被认定为确实有比较大的值，比如说 -1.5 W m^{-2} ，那么对流层气溶胶的总辐射强迫就将与温室气体的辐射强迫在数值上近乎相抵消。这样一来，温室气体和气溶胶共同作用的结果将只对大气有较小的辐射强迫影响，并不会导致全球气温的显著升高。那么，也就需要再研究是什么其他原因引起了全球气温的明显升高。

近年来，利用海—气耦合模式对 20 世纪气候变化所作的模拟研究进一步表明，如果只考虑 CO_2 增加的影响，那么模拟得到的全球变暖的幅度要大于实际观测结果；当同时在模式中引入硫酸盐气溶胶的直接影响后，其模拟结果比较接近实际观测^[13~15]。显然，硫酸盐气溶胶对全球气温的变化有重要影响，只单独考虑温室气体增加的作用无疑会抬高全球气温变暖的可能性。

但是，如果认为图 1 所给出的对于气溶胶辐射强迫的估计是大致可信的，那么对流层气溶胶的间接（负）影响是十分重要的，必须考虑。然而，如果在 Mitchell 等^[13]的模拟试验中还再引入对流层气溶胶的间接（负）影响的话，其耦合模式的模拟气温就将会比实际观测低得多。这样，温室气体的增加和对流层气溶胶的共同影响仍将不能完全说明上世纪以来全球明显增暖的事实，还应该另有原因。

最近，关于 20 世纪近地面温度变化的数值模拟结果还清楚地表明，近世纪的显著增温既有人类活动的影响（温室气体和气溶胶的增加），也有自然因素（太阳活动及平流层气溶胶）的作用，而且在前半世纪以自然因素的作用为主^[16, 17]。因此，关于全球增暖问题，需要认真考虑太阳活动的影响。

3 太阳活动的直接辐射强迫影响

太阳活动引起的辐射能的变化对地球气候的直接影响一直为人们所关注，尤其是在十年到世纪时间尺度上。资料分析清楚地表明，在近 130 年以来全球平均海面温度异常（SSTA）与太阳活动的强度（年滑动平均的黑子数）之间有明显的正相关^[18]；而且太阳黑子数变化超前 SSTA 的变化。图 2 是 Reid 最近给出的分

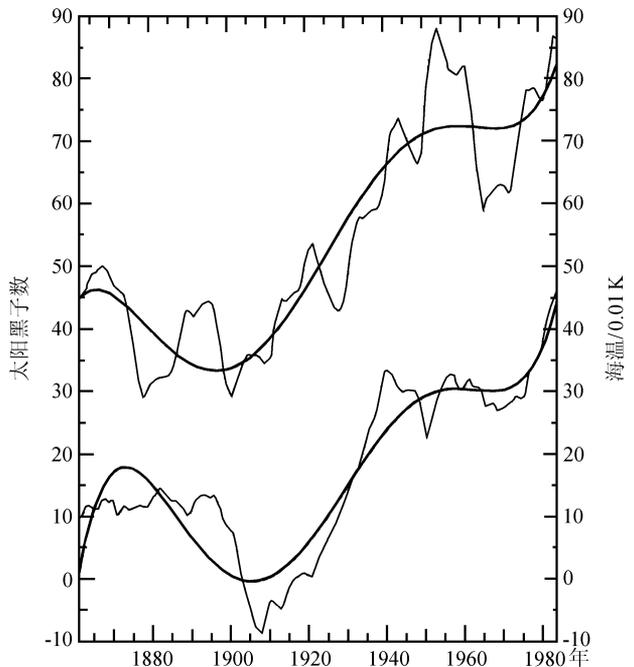


图 2 11 年滑动平均的年太阳黑子数（上）和年平均全球海面温度距平（下）的时间变化（引自文献 [19]）

析结果^[19], 不仅全球平均海面温度异常 (SSTA) 与太阳活动的强度有一致的变化特征, 而且太阳活动的强度变化在海面温度变化之先。

为了进一步显示太阳活动的低频部分的重要作用, 图 3 给出了近 250 年以来太阳黑子数小波分析的 11 年谱系数 (反映太阳活动强度)、1871~1997 年全球平均 SSTA 及其 40~50 年和 180 年低频系数之和的时间变化曲线^[20]。很显然, 自 1910 年之后全球平均 SSTA 及其低频变化都有明显的上升趋势; 而太阳黑子的 11 年谱系数在 1900 年之后有明显的增大, 其增大的趋势还发生在增温之前。也就是说, 全球平均海温距平的升高同太阳活动强度的低频谱的增强有十分一致的关系。

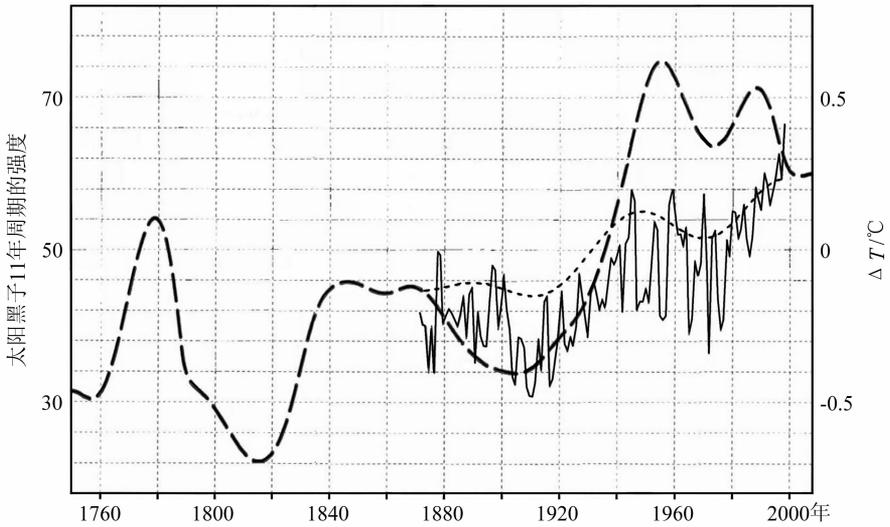


图 3 近 250 年以来太阳活动强度的 11 年周期谱系数 (粗虚线, 1998 年之后为 NOAA/NGDC 的预报值)、1871~1997 年全球平均 SSTA (细实线) 及其 40~50 年和 180 年谱系数之和 (细虚线) 的时间演变 (引自文献 [20])

虽然 GCM 的气候模拟表明, 若要全球平均温度下降 0.46°C , 则需要太阳辐射量减少 0.25% ^[21], 似乎太阳辐射变化的直接影响比较困难。但是, 一方面由于气候系统的非线性有可能使这种直接辐射强迫的作用增强, 包括对地球上不同地区的不同影响; 另一方面由于太阳活动对辐射量的影响主要在紫外波段^[22], 可能其辐射强迫先主要影响平流层, 然后再通过其他过程影响对流层。当然, 有关具体过程及其影响程度目前尚不十分清楚, 还有待深入研究。

因此, 太阳活动的直接辐射强迫, 尤其是低频变化部分的辐射强迫, 通过气候系统的非线性响应, 也有可能成为全球近世纪以来增暖的一种重要原因。

4 太阳活动、地磁场变化和全球气温

太阳黑子活动的平均周期为 11 年左右, 但实际上这个周期的长度在不同的时期却是不同的, 反映出太阳活动的另一种变化特征。图 4 给出的是近 600 年来太阳黑子活动周期长度的演变特征^[29], 可见其周期长度的变化幅度还是不小的, 最长可达 12 年, 最短不到 10 年, 即振幅可达 10% 以上。已有研究表明, 太阳黑子活动周期长度的变化

与全球气温变化有很好的一致性^[23, 24]，说明太阳活动和全球气温变化有紧密关系，而地球温度的变化一般难以影响太阳的活动，最有可能的是太阳活动对全球气温的升降有明显影响。

太阳活动能够明显地引起地球磁场的变化是大家熟知的事实，勿需更多论述。而从现有的研究结果看，太阳活动—地磁场改变对地球气候的影响主要有两种物理过程，即热力过程和动力过程。

那么，太阳活动通过改变地球磁场也将会由其热力过程和动力过程而影响全球气温的变化。下面，我们将就上述两种过程分别做简要讨论。

(1) 地磁场能量和全球气温

地磁场及其变化同天气气候的关系也已有一些研究^[25~27]，而地磁场的变化又同太阳活动有明显关系。利用地磁场观测参数，可以计算出地磁场的能量^[28]。图 5 给出的是计算得到的 1400 年以来在地球核幔边界上的地磁场能量和 50 年滑动平均的归一化全球气温的时间变化情况^[29]。首先，地磁场能量的变化同全球气温变化有相当好的一致性，其同时相关系数达 0.778，超过 99% 的可信度；而且，地磁场能量的变化似乎超前全球气温的变化，尤其是 1500 年之后的变化。例如，1700 年以后和 1870 年以后的增温都发生在地磁场能量增强之后，1770 年之后的降温也在地磁场能量减小之后。同时，比较图 4 和图 5 还可以发现，地磁场能量的变化与太阳活动（黑子周期长度）变化有明显的关系，尤其是 1680~1770 年和 1860 年之后的地磁场能量的增加都与黑

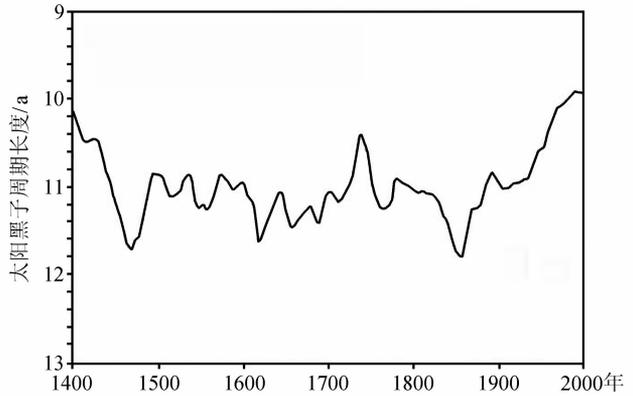


图 4 近 600 年以来太阳黑子周期长度的变化（引自文献 [29]）

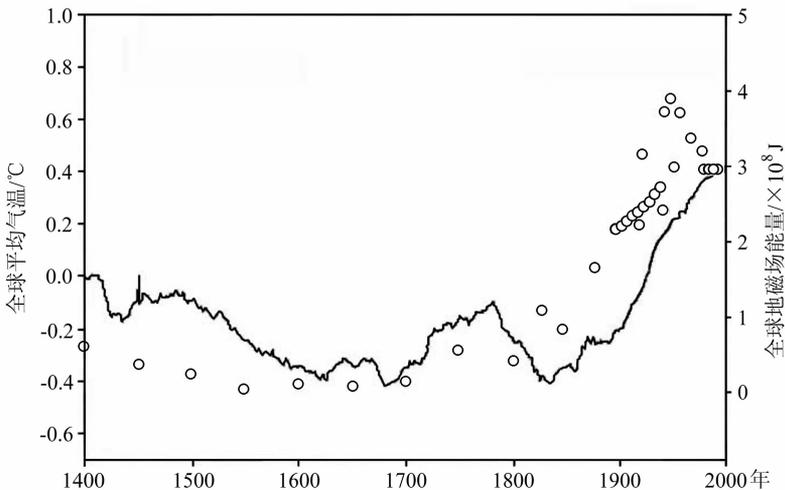


图 5 近 600 年来核幔边界上全球地磁场能量（圆圈， $\times 10^8 \text{ J}$ ）和 50 年滑动平均的归一化全球气温（实线， $^{\circ}\text{C}$ ）的变化（引自文献 [29]）

子周期长度的变短有明显关系。

因此,太阳活动(黑子周期长度的变短)所引起的地磁场能量的变强,也可能成为导致全球气温升高的一个重要原因。尤其是近一个世纪以来的全球增暖也有可能是太阳活动变化(黑子周期变短)间接影响的结果,尽管太阳活动变化引起地磁能量变化之后,再如何引起地球气温的变化还须深入研究。已有研究表明,地磁能量变化可以通过火山爆发影响地球气候的变化^[30, 31],还可以通过地热流影响地球气候的变化^[32]。

(2) 地磁场—地球自转速度和全球气温变化

太阳活动引起地球磁场的变化,再引起地球自转速度的长周期变化(尤其在年代及以上时间尺度上),进而引起地球气候的变化,极可能是太阳活动影响地球气候的重要动力过程^[33]。

地磁场的变化除了上面已讨论的可引起地磁场能量变化之外,还将引起地壳内部磁流体(溶浆)运动的改变。因为地球外核是以铁镍为主要成分的熔融态合金,其粘滞度近似于水,也可视为磁流体。地球磁场变化所产生的磁力异常将引起地球外核流动的改变,而外核流动的改变通过核幔耦合作用,包括电磁耦合、粘性耦合、热力耦合和地形耦合等过程,不仅对地幔产生影响^[34~38],而且会引起地球自转(日长)长周期的变化^[39, 40]。地球自转速度(日长)的变化,通过固体地球与大气和海洋间的角动量交换将引起大气环流和海洋环流的变化(在亚季节到年际时间尺度范围内,角动量交换尤为显著^[37])。以大气为例,如果固体地球自转速度变快(慢),日长变短(长),热带大气获得的东风角动量将增多(减少),大气环流乃至海洋环流都要发生变化。也就是说,地球磁场变化通过引起地球自转(日长)的长周期变化,最终有可能影响地球气候,从而也可能影响全球气温的变化。

图6给出的是1650年以来日长距平(相对平均值86400 s的偏差)的演变情况,其资料分别来自美国宇航局(NASA/JPL,根据潮汐模型理论,潮汐对日长周期变化的影响已扣除, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>)和国际地球自转服务机构(International Earth Rotation Service—IERS)。可以清楚看到,自1650年之后,日长有变长的总趋势(+1.4 ms/ha),主要是日、月对地球的海洋潮汐摩擦(+2.3 ms/ha)、地幔的粘弹性以及地球物质质量再分布引起的地球主惯性张量变化的综合效应。自1850年之后,核幔耦合作用引起的日长不规则变化同全球温度曲线相比较,可以发现这种



图6 近350年来日长距平(单位:ms)的时间演变,实线:NASA资料;虚线:IERS资料

日长的变化与全球温度的变化在相同时间尺度上有着相当好的负相关性（如 1900～1920 年、50 年代和 1965～1975 年）。即在年代际时间尺度，日长和全球温度的变化是反向的。但是，注意更长时间的变化，即在 100 年以上的的时间尺度，日长和全球温度却有相同的变化趋势。也可以认为，日长变长，有可能对全球温度的升高有影响。

5 结语

全球增暖及其影响是全世界都十分关注的问题，但目前对全球增暖原因的一些结论尚有不确定性和疑点，需要从不同角度进行深入研究，方能得到关于全球增暖的全面的完整科学解释。

人类活动所导致的温室气体含量增加，无疑会通过温室效应的加剧而引起全球温度上升，从而成为引起全球增暖的重要原因之一。温室气体的减排以及防止全球环境恶化等一系列措施无疑也是十分重要而有效的，有关的研究工作和政策、措施仍应加强。

同自然界一切现象一样，全球增暖的原因也是十分复杂的，是多种因素影响的结果。鉴于目前有关辐射强迫估计的不确定性，不宜将温室效应加剧视为全球增暖的唯一原因。本文的初步分析表明，太阳活动的变化，包括其直接辐射作用和引发地磁场变化的间接作用，极可能是全球增暖的一种重要“自然”因素，尽管这方面仍然有不少科学问题尚待深入研究。

参 考 文 献

- 1 Jones, P. D., Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993, *J. Climate*, 1994, **4**, 1794～1802.
- 2 Hansen, J. E., R. Ruedy, J. Glascoe et al., GISS analysis of surface temperature change, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 30997～31022.
- 3 龚道溢、王绍武, 近百年来中国最暖的一年, *气象*, 1999, **25**, 1～3.
- 4 Mann, M. E., R. S. Bradley, and M. K. Hughes, Global scale temperature pattern and climate forcing over the past six centuries, *Nature*, 1998, **392**, 779～787.
- 5 IPCC, *The Science of Climate Change* (Houghton, J. T. et al., Ed.), Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1996.
- 6 IPCC, *The Science of Climate Change* (Houghton, J. T. et al., Ed.), Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 2001.
- 7 Lamb, M. H., *The Changing Climate*, selected paper, Methuen, London, 1966.
- 8 Stauffer, B., T. Blunier, A. Dillenbach et al., Atmospheric CO₂ concentration and millennial-scale climate change during the last glacial period, *Nature*, 1998, **392**, 59～62.
- 9 Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud et al., Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, **399**, 429～436.
- 10 Fischer, H., M. Wahlen, J. Smith et al., Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Science*, 1999, **283**, 1712～1714.
- 11 Lindzen, R. S., Some coolness concerning global warming, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1990, **71**, 288～299.
- 12 Svensmark, H., Influence of cosmic rays on climate, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**, 5027～5029.

- 13 Mitchell, J. F. B., T. J. Johns, J. M. Gregory et al., Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols, *Nature*, 1995, **376**, 501~504.
- 14 Meehl, G. A., W. M. Washington, J. M. Arblaster et al., Anthropogenic forcing and climate system response in simulations of 20th and 21st century climate, *J. Climate*, 2000, **13**, 3728~3744.
- 15 Roeckner, E., L. Bengtsson, J. Feichter et al., Transient climate change simulation with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle, *J. Climate*, 1999, **12**, 3004~3012.
- 16 Tett, S. F. B., P. A. Stott, M. R. Allen et al., Causes of twentieth-century temperature change near the earth's surface, *Nature*, 1999, **399**, 569~572.
- 17 Stott, P. A., S. F. B. Tett, G. S. Jones et al., Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes, *Climate Dynamics*, 2001, **17**, 1~21.
- 18 Reid, G. C., Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record, *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**, 2835~2844.
- 19 Reid, G. C., Solar Variability and the Earth's climate: Introduction and overview, *Solar Variability and Climate* (E. Friis-Christensen, et al., Eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2000, 1~11.
- 20 Weng Hengyi, Multi-scale response of global sea surface temperature to solar activity, 10th Symposium on Global Change Studies, Dallas, Texas, 10-15 January 1999.
- 21 Rind, D., and J. Overpeck, Hypothesized causes of decade to century climate variability: climate model results, *Quat. Sci. Rev.*, 1993, **12**, 357~374.
- 22 Lean, J., Contribution of ultraviolet irradiance variations to changes in the Sun's total irradiance, *Science*, 1989, **244**, 197~200.
- 23 Friis-Christensen, E., and K. Lassen, Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate, *Science*, 1991, **245**, 698~700.
- 24 Kelly, P. M., and T. M. L. Wigley, Solar cycle length green house forcing and global climate, *Nature*, 1992, **360**, 328~330.
- 25 Gribbin, J., Geomagnetism and climate, *New Sci.*, 1981, **89** (1239), 350~353.
- 26 Bucha, V., Solar and geomagnetic variability and changes of weather and climate, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1991, **53**, 1161~1172.
- 27 曾小苹、林云芳、续善荣, 地球磁场大面积短暂无异常与灾害性天气相关性初探, 自然灾害学报, 1992, **1**, 59~65.
- 28 Matsushita, S., Solar quiet and limar daily variation-fields, *Physics of Geomagnetic Phenomena* (Matsushita and Campbell, Eds), Academic Press, London and New York, 1967.
- 29 高晓清、柳艳香、董文杰等, 地磁场与气候变化关系的新探索, 高原气象, 2002, **21**, 395~400.
- 30 Giovonni, K., and P. Gregorizai, Geomagnetism volcanoes, global climate change and predictability, A progress report, *Annali di Geofisica*, 1994, **37**, 1329~1340.
- 31 Giovonni, K., P. Gregorizai, and Wenjie Dong, The correlation between the geomagnetic field reversals, the Hawaii volcanism and the motion of the Pacific plate, *Annali di Geofisica*, 1996, **39**, 49~65.
- 32 Tang Maocang, and Gao Xiaoping, Some statistic characteristics of "Underground Hot Vortex" in China during 1980-1993, 1. Spatial-temporal distribution of Underground Hot Vortex, *Science in China* (Ser D), 1997, **40**, 561~566.
- 33 李崇银, 年代际气候变化研究, 21 世纪初大气科学回顾与展望, 北京: 气象出版社, 2000, 68~72.
- 34 Rochester, M. G., Geomagnetic core-mantle coupling, *J. Geophys. Res.*, 1962, **67**, 4833~4836.
- 35 Hide, R., Interaction between the Earth's liquid core and solid mantle, *Nature*, 1969, **222**, 1055~1056.
- 36 Jault, D., and J. L. LeMouel, Exchange of angular momentum between the core and mantle, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1991, **43**, 111~129.
- 37 Voorhies, C. V., Coupling an invicid core to an electrically insulating mantle, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1991,

- 43, 131~156.
- 38 Bucha, V. , Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation, *J. Atmos. Sol. -Terr. Phy.* , 1998, **60**, 145~169.
- 39 傅容珊、李力刚、郑大伟等, 核幔边界动力学——地球自转十年尺度波动, 地球科学进展, 1999, **4**, 541~547.
- 40 Zhong, M. , I. Naito, and A. Kitoh, Atmospheric, hydrological, and ocean current contributions to Earth's annual wobble and length-of-day signals based on output from a climate model, *J. Geophys. Res.* , 2003, **108**, XXXX, doi:10.1029/2001JB000457.

Initial Investigation of Another Possible Reason to Cause Global Warming

Li Chongyin¹⁾, Weng Hengyi¹⁾, Gao Xiaoqing²⁾, and Zhong Min³⁾

- 1) (*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)
- 2) (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000*)
- 3) (*Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077*)

Abstract The solar radiation is a fundamental energy source to cause the motions of geophysical fluid (the atmosphere, the ocean and so on), so that the global environment, particularly the climate variability must be connected with the solar activity. At present, it is universal to put the blame of the global warming on the aggravation of greenhouse effect caused by the concentration increase of the greenhouse gases. This is truth in a certain sense, but from the scientific theory, the concentration increase of the greenhouse gases caused by anthropogenic activity is not only reason to lead to the global warming. Based on some studies, it is investigated initially from the forcing of the solar activity and found that the solar activity is another possible important reason of the global warming, especially in the recent century. The influences of the solar activity include the direct radiation effect and the indirect effect through the geomagnetic field variation. The geomagnetic field variation will influence the atmospheric circulation and climate through dynamic and themodynamic processes.

Key words: global warming; greenhouse gases; the solar activity; geomagnetic field variation