

利用 GCM 模式对全球雷电活动的 模拟分析*

张敏锋 刘欣生 张义军

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要 将修正的参数化方案嵌套入美国马里兰大学海-陆-气研究中心的全球大气环流谱模式 (COLA GCM), 建立了可用于全球雷电活动模拟与估测的模式系统。通过对模式输出与实况资料的对比, 检验其气候模拟性能。虽然模式的分辨率较低但经过较长时间积分, 仍可再现实况资料的主要特征。性能良好, 计算稳定, 且因时间步长较大可大大节省机时。耦合模式系统经长时间的积分后, 模拟的多年平均的全球雷电频次时空分布及变化与观测分析较一致。全球范围内每秒钟平均有 79 次的雷电发生, 陆海比为 12.2。多发生在北半球夏季且具明显的季节变化特征。

关键词: 耦合模式; 全球雷电分布; 数值模拟

1 引言

通过局地方法和全球分析综合而产生的对流云顶高度与雷电活动频次的关系, 可较好地表征全球雷电活动的时空特征^[1]。作为灾害性天气预警的一种辅助手段, 全球雷电资料库的建立和分析将在航空、航天等方面发挥巨大作用, 尤其对于那些天气观测网和地闪探测网没有覆盖到的地区。由于从卫星资料和雷达回波的反演结果以及全球大气环流谱模式 (GCM) 中均可得到对流云顶高度值, 因此利用耦合了云顶高度与雷电频次参数化方案的 GCM 模式, 模拟和预估雷电活动的时空分布及强度是合理、可行的。为了得到较为合理和客观的全球雷电模拟结果, 首先必须对 GCM 的气候模拟效果进行检验。

2 模式介绍

2.1 模式概要

本文选用的 GCM 模式是美国马里兰大学海-陆-气研究中心 (COLA) 的全球大气环流谱模式, 该模式在美国国家气象中心 (NMC) GCM 基础上发展而成。模式控制方程组包括动量方程、热力学方程、连续性方程及水汽守恒方程, 预报变量分别为涡度、散度、温度、地表气压和水汽混合比。原模式为菱形截断 7 波, 垂直方向采用 σ 坐标, 共分 9 层。文献[2]将其调整为菱形截断 15 波 [$4.5^\circ(\text{Lat.}) \times 7.5^\circ(\text{Lon.})$], 即为

1999-05-24 收到, 2000-10-24 收到再改稿

* 中国科学院重大项目 KZ951-B1-405 资助

R15L9。采用 Arakawa 二次守恒有限差分格式, 时间积分采用 Robert 半隐式后差, 积分时间步长为 30 min。

2.2 模式物理过程及参数化

2.2.1 降水过程的参数化

大气中的凝结可分为大尺度运动造成的凝结和积云对流产生的凝结。前者范围大, 持续时间长, 过程降水量有时较大。后者尺度较小, 上升速度较大, 热带地区的降水大多属于此种性质。模式中大尺度降水采用饱和凝结法, 即空气中的水汽达到饱和, 凝结并产生降水, 其直接效果是空气中湿度减小而温度升高。

积云对流参数化是利用 Kuo 型方案^[3]。大气中存在深厚的条件不稳定层, 且边界层有大尺度的水汽辐合, 边界层顶有上升运动而造成凝结降水。积云活动的结果, 一是云顶流出的水汽、液态水及冰的升华使得环境空气降温、增湿; 二是云内强烈的上升气流引起环境大气的补偿下沉运动, 使环境空气变暖变干; 三是对流产生的云影响了辐射过程。

2.2.2 辐射过程和云的参数化

大气环流产生和维持的最终能量, 来源于太阳短波辐射和地气系统长波辐射的差额。对于气候研究而言, 辐射过程的精确计算更为重要。臭氧吸收的太阳辐射是平流层加热的主要来源, 吸收带主要在可见光和紫外谱段。水汽对短波辐射的吸收是大气中主要的太阳辐射加热源。短波辐射加热和长波辐射加热分别采用 Lacis^[4]和 Harshvardhan^[5]等的方案。

模式中对 4 类云进行预报, 即高层层状云、中层层状云、低层云和穿透性对流云。中、高层层状云允许占据模式中的一层, 其云量由各层上的相对湿度决定; 低层层状云的云量决定于相对湿度以及较低层次的层结稳定性和垂直运动的速度; 穿透性对流云量取决于深对流参数化中求得的积云降水量之大小。

2.2.3 摩擦项和陆面过程

模式中小尺度耗散由水平扩散项参数化得到。采用垂直坐标面上的线性四阶扩散作为对涡度、散度、温度和比湿场的“水平”平滑。垂直扩散包括行星边界层 (PBL) 及自由大气的湍流输送和近地面层的湍流输送。地表重力波产生的垂直通量为 $\tau = \rho U N K h'^2$, 其中 U 是近地面基本气流, N 是 Brunt-Väisälä 频率, $K = 1/l^*$, $l^* = dx/m$ (dx 是次网格尺度地形的方差, m 是格内山脉数目), h' 为地形改变造成的垂直位移, 可理解为相对高度的方差。

此模式的重大特点是耦合了一个较为完善、细致的陆面过程方案——简化的简单生物圈模式 (SSiB)^[6]。SSiB 克服了过去传统的水文模式——水箱模式的缺陷 (即辐射、感热、潜热和动量通量等相互独立, 反照率、粗糙度、拖曳系数互无关系), 使得上述各参量通过参数化成为一个有机的相互补充的整体。

3 模式性能检验

虽然以前对该模式进行了性能检验^[2], 也用它作了夏季西北地区干旱气候形成的模拟试验^[7]。并通过与兰州高原大气物理研究所有限区域模式 (LIPAP LAM) 的嵌套, 揭示了青藏高原前冬积雪异常对我国东部汛期降水的影响机制^[8]。但由于受具体研究内

容及研究对象的限制, 模式积分时间较短。要进行较长时期的气候模拟试验, 必须对控制试验的模拟输出进行检验。

COLA GCM 的初始场取自欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 多年 6 月平均的温、压、湿及流场的 $2.5^\circ (\text{Lat.}) \times 2.5^\circ (\text{Lon.})$ 的格点分析资料, 具体定为 6 月 15 日 00 (UTC) 对应场的值。自 6 月 15 日 00 (UTC) 开始, 连续积分 10 年半。为确保模式能达到充分的平衡状态, 文中仅采用第二模式年后的平均结果为 COLA GCM 模拟的各月平均气候。

模式较成功地再现了 7 月份控制欧亚大陆的热低压。中心位置与观测值较一致, 强度偏高 $5 \sim 10 \text{ hPa}$ 。北大西洋和北太平洋的高压中心位置与观测^[9]结果相当一致, 对北美低压、澳大利亚冷高及环南极低压带模拟较好。成功模拟了北半球夏季海平面气压图上的大部分特征 (图略)。500 hPa 高度场中, 较好再现了南北半球中高纬度西风环流的主要特征及其范围, 在对白令海峡南部、北美北部、地中海和北大西洋小槽的模拟结果中更显清楚。

在 NCEP 再分析资料多年平均的 100 hPa 位势高度场上, 30°N 附近是一条高压带, 两强度相近的南亚高压分别位于青藏高原中南部和阿富汗南部上空, 中心强度约为 1687 gpm。模拟的脊线位置相近, 高压中心合二为一且强度较大 (图略)。COLA GCM 模拟了 7 月高原及其周边大气对流层高层以南亚高压为中心的基本环流特征。

虽然 COLA GCM 的水平分辨率还比较粗糙, 但通过对全球范围及区域尺度内高低空不同层次、不同气象要素的分析, 该模式可较长时间地积分且性能较好。同时由于动力积分时间步长较大亦可大大节省机时。

4 模式系统对雷电活动的模拟

本模拟试验中 GCM 模式内的各种气象参量意义与性能检验中的完全相同, 试验的设计及模式初始场的选取一致。因为雷暴的起电过程与上升气流强度有密切关系, 因此它也与对流云的垂直发展相联。雷电活动频数 F 的参数化采用 (1) ~ (4) 式:

$$F_m = 4.664 \times 10^{-4} H^{2.02}, \quad (\text{海洋型}) \quad (1)$$

$$F_{GL} = 2.31 + 6.91H^{4.9} + 11.18H^{5.4}, \quad (2)$$

$$F_{GM} = 1.85 + 9.84H^{4.6} + 16.72H^{5.4}, \quad (3)$$

$$F_{GH} = 0.52 + 3.54H^{4.4} + 8.53H^{5.4}, \quad (4)$$

其中, (1) 式适用于全球范围内的海洋地区, (2)~(4) 式分别用于低纬、中纬和高纬度的大陆范围。定义 $52.5 \sim 87.5^\circ \text{N(S)}$ 为高纬度区, $25 \sim 52.5^\circ \text{N(S)}$ 为中纬度区, $25^\circ \text{S} \sim 25^\circ \text{N}$ 为低纬度区。由于资料所限没有建立起完全适合于南半球的参数关系, 文中对南半球的模拟仍采用北半球的参数化方案。海陆类型的判别主要依据 GCM 模式中各格点盒所处位置的海拔高度来实现, 海拔高度大于零作陆地型处理, 小于或等于零为海洋型。

参数式中的 F_m 、 F_{GL} 、 F_{GM} 、 F_{GH} 和 H , 分别为海洋地区、全球陆地低纬地区、全球陆地中纬地区和全球陆地高纬地区的雷电频次 (次数/s) 及该区的对流云顶高度 (km)。在 COLA GCM 模式中, 大尺度动力过程和湿对流参数化分别是每 30 min 和

每 1 h 计算一次, 模式对典型雷暴过程 (经常小于 1 h) 的模拟则为大气在 1 h 之内平均变化的体现。

在 GCM 模式的应用中, 一个比较关键的问题是空间尺度。由于模式中对流参数化方案的水平分辨率为 4.5° (Lat.) $\times 7.5^\circ$ (Lon.), 单个积云单体的水平尺度常常为 5~10 km, 因此如不对其进行修正, 模式输出的雷电频次就大大低于实况。为此在雷电频次-对流云顶高度的参数化方案建立过程中^[1], 通过对局地信息和全球情况的综合考虑, 较合理地解决了因 GCM 模式分辨率而引起的对流云平均效应和大中尺度相匹配的问题。故文中模式输出的雷电频次可直接用于与观测值的比较分析。

4.1 总闪的模拟分析

利用前述方案计算雷电频次的关键是要判断雷暴的性质 (陆地型、海洋型)。图 1 为 4~5 月份全球总闪的实况观测^[10]和模式输出。在观测时段内其主要集中在 4 个区域: 北美及加勒比海地区、中北非洲、东南亚地区和西北欧。南亚地区为其最频繁区域, 密度高达 15 次 / ($4.5^\circ \times 7.5^\circ \cdot \text{min}$)。中非为次高值区且分布范围广大, 几乎覆盖了整个中部非洲。大洋洲、东欧、东北亚及美洲北部地区几乎无雷电发生。欧洲及美洲雷电频次不多, 但分布十分广泛, 其密度大多处于 2~4 次 / ($4.5^\circ \times 7.5^\circ \cdot \text{min}$) 以下。模式较好地再现了 4 个高值中心的地理位置, 但对分布范围和落雷密度, 模拟与观测有一定出入。

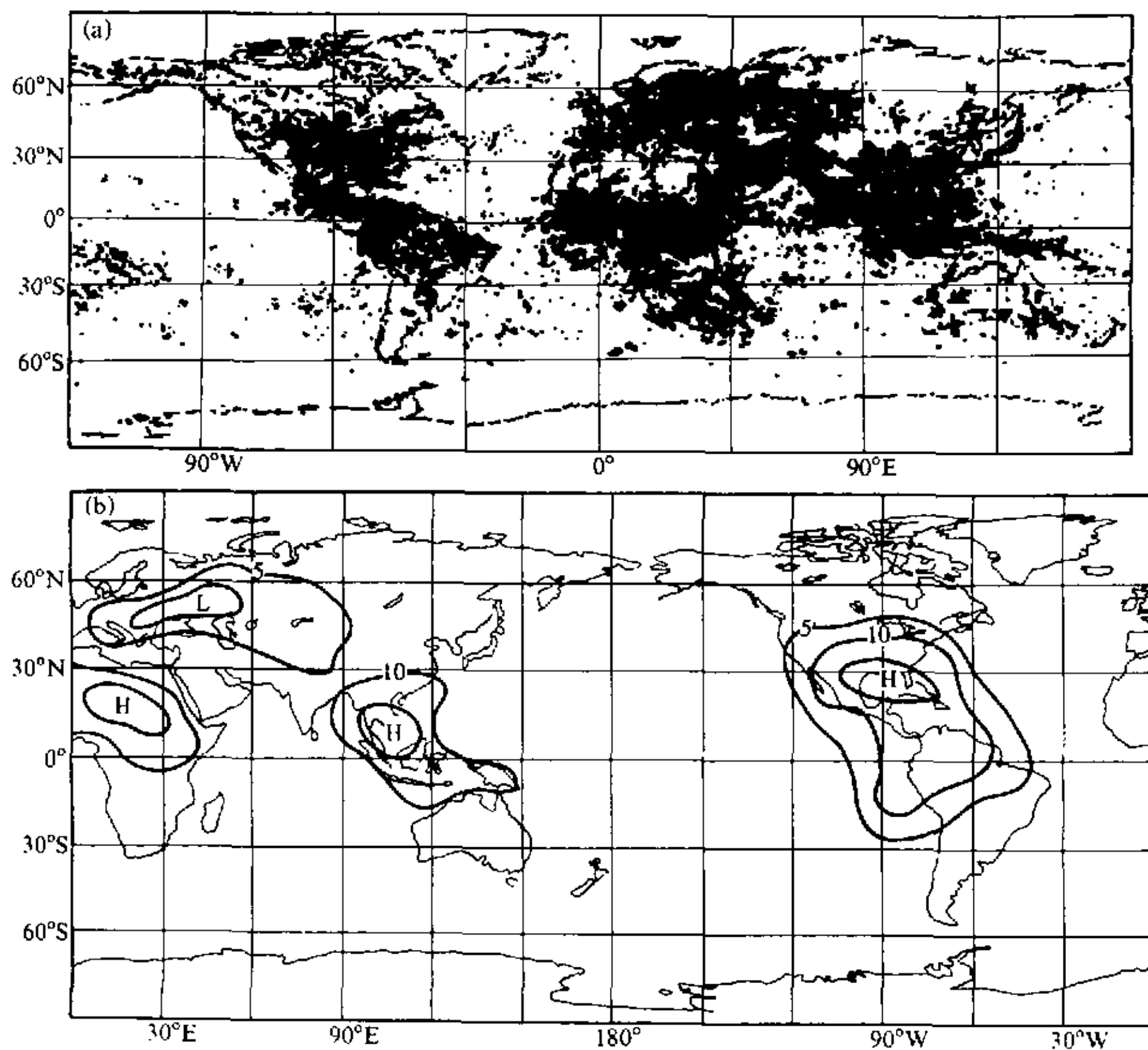


图 1 4~5 月份全球雷电活动分布
(a) 观测分析; (b) GCM 模拟

为考察雷电活动多年平均模拟值与观测值的一致程度, 进行以下两种统计检验。第一, 如果在一格点盒内有雷电发生令其为 1, 反之为 0。若相同格点内观测和模拟值同时为 1 或 0, 认为它们空间分布一致。若两数值有异, 此格点盒在空间上是不匹配的。图 1 中海洋型和陆地型格点盒的空间一致率分别为 91% 和 84% (全球为 86.5%)。第二, 对 4~5 月的雷电观测资料进行 3 年的平均得到其空间分布, 同时得到 COLA GCM 输出的雷电资料的 10 年平均空间场。这样观测和模拟资料的空间分布场分别组成两个样本序列 (长度为 $48 \times 40 = 1920$), 两样本序列的相关系数为 0.587, 除去极值的影响此系数可增至 0.654。如果有更长的观测数据序列, 雷电探测器的探测效率是一非常明确的数值或全球模式有更高的分辨率, 二序列的一致程度更高。

全球范围内, OTD (Optical transient detector) 雷电频次的观测值为 86 次/s, Turman 等的观测为 25~74 次/s^[11]。文献 [12] 的模拟结果为 67 次/s, 本文的模式输出频次为 79 次/s。因此不论是与观测值或与已有的模拟值相比, 本文的模拟结果都是可信和合理的。通过两种统计检验的分析, 也进一步说明模式对雷电频次的模拟是成功的, 其误差在允许的范围之内。

4.2 季节变化

实况观测中雷电活动的季节变化明显 (图略)。北半球冬季, 雷电活动主要分布在南半球大陆; 春季则随

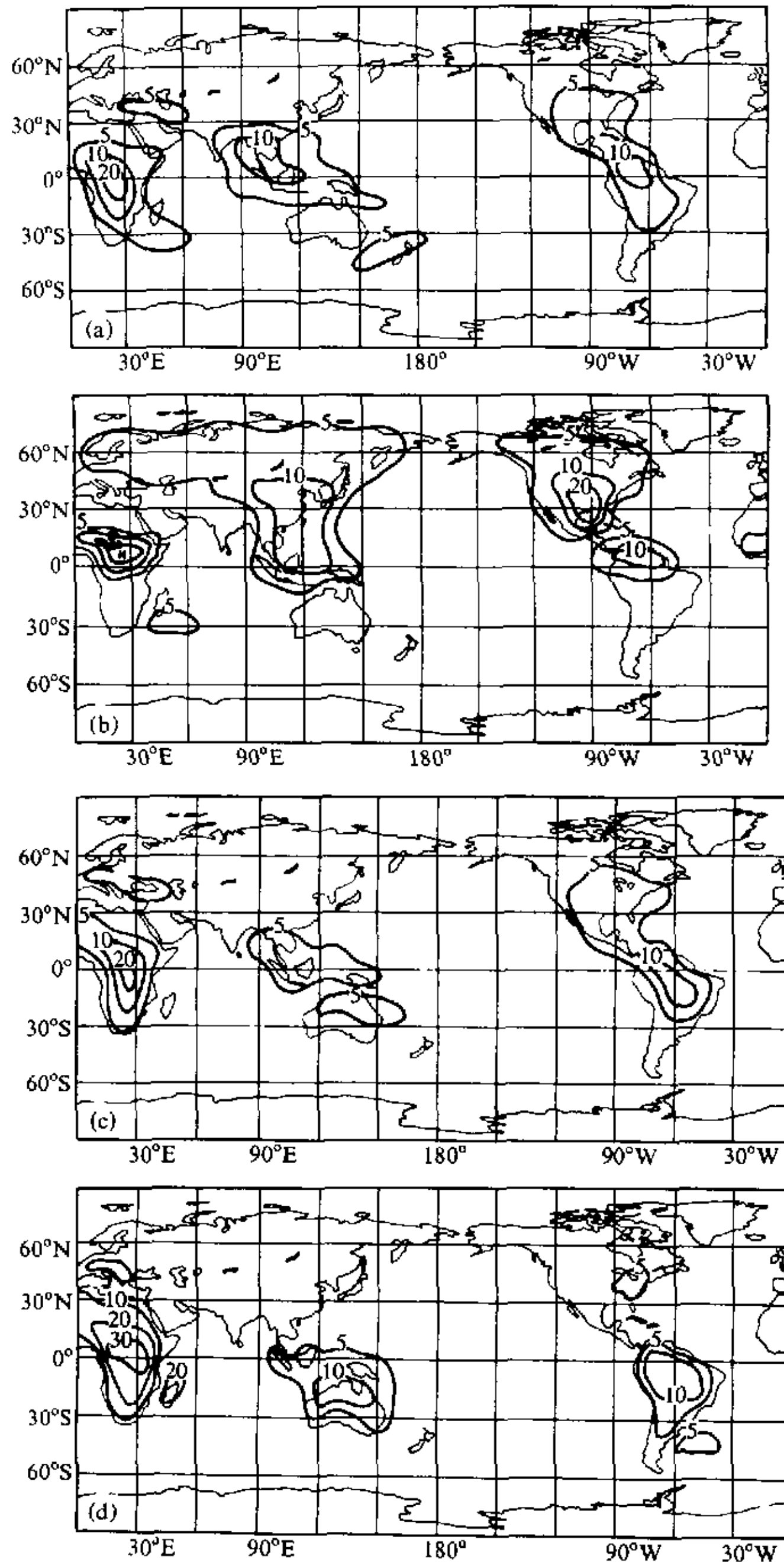


图 2 模拟的全球雷电季节变化
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

机地分布在南北半球的大陆范围内；夏季主要位于赤道以北的大陆上，非洲北部及中亚地区几乎没有雷电活动；至秋季，北半球雷电频次急剧减少， 60°N 以北很少有雷电事件发生，南半球整个大陆广布雷电。雷电活动的分布与太阳日射率的最大值有密切的联系，而日射率是随着太阳的南北移动而变化的。雷电活动的上述变化似与热带辐合带的季节移动有关。模式系统再现了雷电季节变化的基本特征（图 2a~d），强度模拟亦较为接近。南半球及海洋地区的模拟效果相对较差，这可能是由雷电参数方案的区域依赖性和全球海洋性参数方案的缺陷所引起。如有较多的南半球资料，须对其进行另外讨论。

类似于观测资料的分析方法^[1]，在图 3 中给出 COLA GCM 模式模拟的不同纬带内雷电活动的年内变化特征。图中各季节内的垂直柱从左到右依次为 $\pm 18^{\circ}$ 、 $\pm 36^{\circ}$ 、 $\pm 54^{\circ}$ 和 $\pm 72^{\circ}$ 内发生的雷电频次。低纬带内雷电的绝对频次最大，其季节间的变化亦较大。纬度愈高，雷电活动的绝对数量愈少且季节间变化亦较小。模式计算与观测分析的基本一致，对量值的模拟有些偏小（全球范围内模拟平均为 79 次/s）。

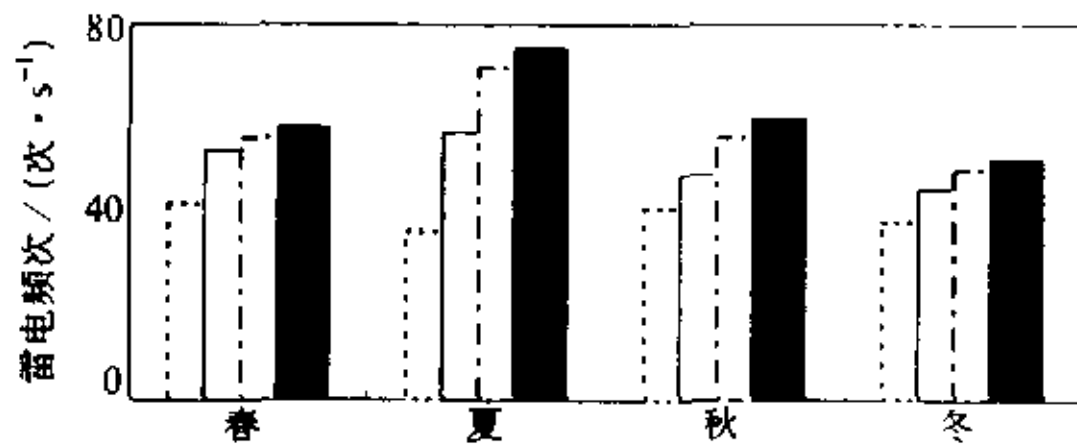


图 3 模拟的不同纬带内雷电频次的季节变化

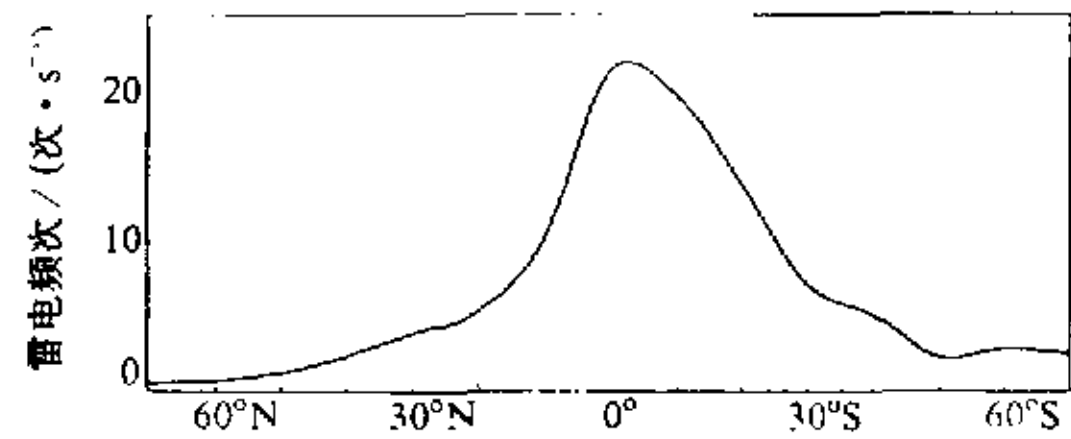


图 4 模拟的多年平均雷电频次沿纬圈的变化

4.3 纬向和经向变化

图 4 为模式输出的雷电活动在纬向的分布。与观测资料一致^[11,13]，GCM 的模拟亦显示雷电活动主要在热带（低纬度）地区，其他地区很少有雷电活动发生。热带范围内发生的雷电次数占模式输出的 68.4% 之多（ $\pm 20^{\circ}$ ）。北半球各纬度带内发生的雷电频次比南半球对应范围内的多，模拟的情况亦是如此。南半球中低纬交界地带，雷电活动频次纬向分布的梯度较大，在大约 10 个纬度的范围内雷电频次锐减 15% 之多。

图 5 显示的是模式输出的总体雷电活动在经向的分布。模拟结果很好的再现了全球三个雷电活动的频发地区， $10\sim 40^{\circ}\text{E}$ 对应非洲高值区， $90\sim 120^{\circ}\text{E}$ 对应东南亚地区和南半球大洋洲陆地， $50\sim 90^{\circ}\text{W}$ 则与美洲大陆相对应。虽然美洲大陆高频次的雷电区在经向的跨度很大，但在单个经圈内雷电绝对频次最多的地区却为亚洲大陆。3 个经向低值区分别对应全球的三大海洋，其中最低值出现在太平洋上，且此低值在经向的分部范围最为宽广。卫星观测资料也表明在此范围内亦很少有雷电事件发生^[13]。

4.4 地表温度的模拟

地表温度变化与全球低纬雷电活动有较密切关系^[14,15]，图 6 给出低纬地区模拟的多年平均的湿球温度随季节的变化。热带地区的湿球温度有明显的季节变化，春季最高，夏季最低，全年内此值的变化幅度高达 0.8°C 。此变化与图 3 中低纬地区雷电频次的季节变化趋势基本一致。与统计分析^[14,15]和其他模拟试验^[12]的结论相似，二因子基本满足

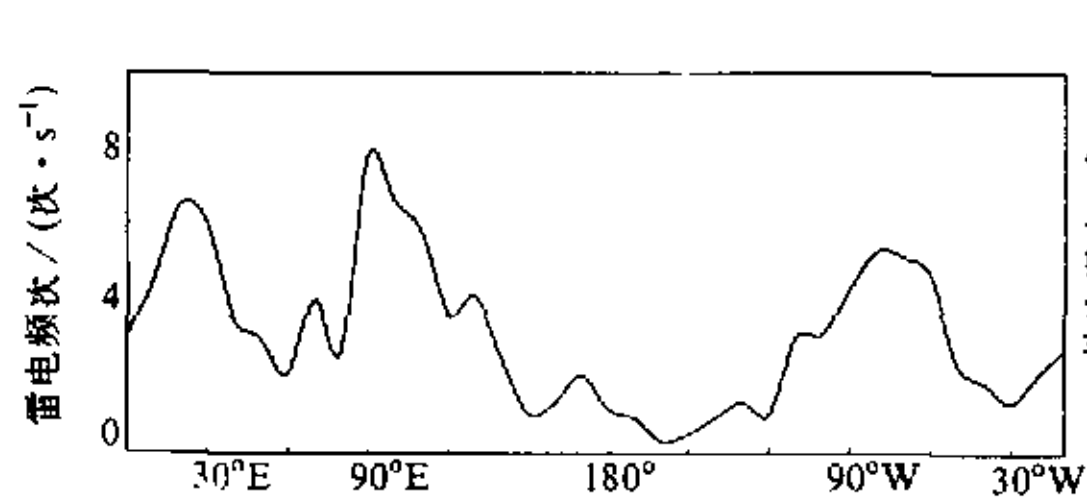


图5 模拟的多年平均雷频频次沿经圈的变化

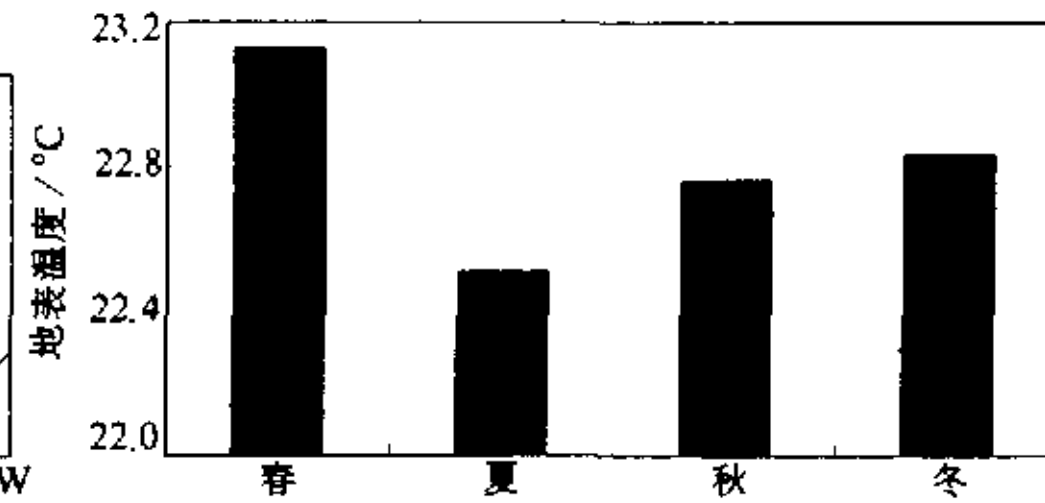


图6 模拟的热带地区地表温度随季节的变化

线性关系。湿球温度控制着大气不稳定程度 (CAPE 的大小), CAPE 又决定着深对流系统中冰相粒子浓度, 后者的大小直接影响雷电放电活动的产生^[16]。因此, 湿球温度愈高雷频频次愈多是合理的。热带地区春秋两季为湿球温度的高值期, CAPE 和雷频频次在季节变化中存在两个高值是正常的。

5 结论与讨论

本文概要介绍了 GCM 的模式概况, 模式物理及各试验方案的设计。通过对模式输出的不同要素在高低空各层次上与实况资料的分析, 检验了模式长时间积分性能。并将建立的雷电-对流云顶高度参数化方案耦合到该 GCM 的积云降水过程中, 通过长时间积分得到了全球雷电活动的时空分布及变化。模式采用了 $4.5^\circ(\text{Lat.}) \times 7.5^\circ(\text{Lon.})$ 的分辨率, 其时间步长为 30 min。

虽然模式分辨率较为粗糙但在较长时间积分后, 仍可再现实况资料的主要特征。性能良好且计算稳定, 因时间步长较大可大大节省计算机资源。模拟结果表明, 全球范围内每秒钟平均有 79 次的雷电事件发生, 其陆海比为 12.2。雷电活动多发生在北半球夏季且具有明显的季节变化特征。此结果与多年平均的卫星资料表现了较高程度的一致。因此从该 GCM 模式系统得到的全球雷电活动的时空分布资料, 可用于宏观雷电灾害的研究, 反演全球对流云分布特征的研究, 讨论雷电活动对全球电路作用的研究以及未来气候变化对雷电分布与强度影响的研究。

致谢: 在本文的完成过程中, 得到言穆弘研究员、焦彦军副研究员的帮助, 谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 张敏锋, 气候变化与雷电活动关系的统计分析及数值试验研究, 中国科学院兰州高原大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- 2 陈丽娟, 吕世华, 一个耦合了简化生物圈方案的全球大气环流谱模式及其性能测试, 高原气象, 1996, 15(1), 112~121.
- 3 Kuo, H. L., On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection, *J. Atmos. Sci.*, 1965, 22, 40~63.
- 4 Lacis, A. A. and J. E. Hansen, A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1974, 32, 118~133.

- 5 Harshvardhan, R. D., D. A. Randall and T. G. Corsetti, A fast radiation parameterization for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**, 1009~1016.
- 6 Xue Y., P. J. Sellers, T. L. Kinter and J. Shukla, A simplified biosphere model for climate studies, *J. Climate*, 1991, **4**, 343~364.
- 7 钱正安、吴统文、吕世华、焦彦军, 夏季西北干旱气候形成的数值模拟—高原地形和环流场等的影响, *大气科学*, 1998, **22**(5), 753~762.
- 8 焦彦军, 一嵌套区域气候模式的建立和中国夏季降水的区域气候模拟, 中国科学院兰州高原大气物理研究所博士学位论文, 1998.
- 9 Schlesinger, M. E. and W. L. Gates, The January and July performance of the OSU two-level atmospheric general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 1914~1943.
- 10 Christian, H. J., R. J. Blakeslee and D. J. Boccippio et al., Global frequency and distribution of lightning as observed by optical transient detector(OTD), Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, USA, June 7~11, 1999.
- 11 Turman, B. N. and B. C. Edgar, Global lightning distributions at dawn and dusk, *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**, 1191~1206.
- 12 Price, C. and D. Rind, Modeling global lightning distributions in a general circulation model, *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**(8), 1930~1939.
- 13 Kotaki, M. and C. Katoh, The global distribution of thunderstorm activity observed by the Ionospheric Sounding Satellite (ISS-b), *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1983, **45**, 833~847.
- 14 Williams, E. R., Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature, *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**(8), 1917~1929.
- 15 Price, C., Global surface temperature and the atmospheric electrical circuit, *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(13), 1363~1366.
- 16 Williams, E. R. and N. Renno, An analysis of the conditional in stability of the tropical atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 21~36.

Simulation Experiments of Global Lightning Distributions by a Coupled GCM

Zhang Minfeng, Liu Xinsheng and Zhang Yijun

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract A general circulation model (GCM) system nested into the parameterizations that relate the depth of convective clouds to lightning frequencies is established and used to study model global lightning distributions and frequencies. The gridded data from NCEP are used to verify the performance of the above model system. The verification shows that the system is stably integrated with good performance. The model can globally simulate main circulation at high altitude area and land surface pressure, so can be used to study climate change and variation. The lightning-cloud height parameterizations are nested into GCM, the preliminary simulations show that the nested system can reproduce the main spatial and temporal characteristics and changes of global lightning. The annually mean global lightning frequency in the model is 79 flashes per second, with a land-ocean ratio of 12.2, and the maximum global lightning activities occur during the Northern Hemisphere summer. The model's lightning climatology is compared with available observations, and statistical tests show there is a good agreement.

Key words: coupled model; global lightning distribution; numerical simulation