

基于 COSMIC 掩星资料的全球第二对流层顶详细特征*

江宇 盛峥[†] 石汉青

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2012年7月2日收到; 2012年8月22日收到修改稿)

使用 2006 年 12 月—2008 年 11 月 COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate) 掩星湿廓线资料对第二对流层顶的全球分布特征进行统计, 对比三个站点的无线电探空仪和 COSMIC 的对流层顶资料, 研究结果表明: 1) 第二对流层顶的出现频率在副热带急流区较高, 冬季在北半球为 50%—70%, 在南半球为 20%—40%; 2) 赤道带的第二对流层顶出现频率约为 20%—26%, 与越赤道急流和对流层顶上的毛卷云有关; 3) 在副热带急流区, 第一对流层顶的温度基本高于第二对流层顶; 4) 在热带, 对流层顶厚度和第二对流层顶出现频率随纬度减小; 热带以外, 对流层顶厚度随纬度增加, 在冬半球 60° 有最大值 7—8 km; 5) 单站点对流层顶的日变化剧烈程度与 COSMIC 和探空仪的对流层顶高度偏差正相关.

关键词: 第二对流层顶, COSMIC, 出现频率, 偏差

PACS: 92.60.hf, 93.85.Pq

DOI: 10.7498/aps.62.039205

1 引言

对流层顶是近年来气象研究领域的一个热点, 它在平流层和对流层水汽、化学物质等交换过程中起着重要作用^[1]. 对流层顶位于对流层和平流层之间, 阻止了水汽、气溶胶等化学物质向平流层扩散; 另一方面, 它也影响平流层的化学物质向对流层传输. 许多气候变化及天气现象, 比如大气环流、气旋、反气旋等都和对流层顶有密切联系^[2,3]. 大气模式模拟结果表明, 对流层顶的长期变化是气候变化的一个指标. 近年来, 人类活动造成的增温和平流层臭氧损耗导致全球对流层顶压力减小, 高度上升^[4].

Randel 等^[1]采用 CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), SAC-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C) 掩星资料和 ERA40 (45-Year European Centre for Medium-Range Weather Intercompar-

ison Project Reanalysis) 再分析资料, 发现第二对流层顶的出现频率与气旋有关, 即 80% 以上的第二对流层顶出现在气旋活动强烈的区域, 在反气旋区域只有 50%. 他们指出 GPS 掩星资料可以用来描述全球第二对流层顶的特征. AneI 等^[6]分析 1965 年至 2004 年的全球无线电探空数据整合资料 (Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA), 认为多对流层顶的出现频率和气旋以及副热带急流有关. Schmidt 等^[7]使用 CHAMP 和 SAC-C 掩星资料, 得到第一第二对流层顶之间的厚度在副热带急流最大, 得出的第二对流层顶高度的纬向分布与文献 [5, 6] 的结果有较大差异. Pan 等^[8]通过分析臭氧剖面和第二对流层顶的关系, 提出了臭氧从平流层进入对流层是第二对流层顶形成的主要原因.

截止目前, 对第二对流层顶的分布特征研究较少, 常用资料有探空仪和掩星数据. 无线电探空仪资料时间长, 主要在陆地上, 洋面上观测资料较少, 缺乏南半球智利以西的太平洋和阿根廷以东

* 国家自然科学基金 (批准号: 41105013)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK2011122) 和空间天气学国家重点实验室开放课题 (批准号: 201120FSIC-03) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 19994035@sina.com

的大西洋以及印度洋上空的观测资料. CHAMP 和 SAC-C 掩星系统与无线电探空仪的温度廓线偏差较小^[8], 但每天只有 ~200 个廓线, 空间分辨率较低. 此外, 再分析资料和甚高频雷达资料^[9] 等也已用来研究对流层顶. 第二对流层顶对平流层和对流层物质传输以及对流层顶的折叠有重要作用^[10-12]. 本文首次使用 COSMIC (Constellation observing system for meteorology ionosphere and climate) 掩星资料对第二对流层顶的全球分布进行统计分析, 并对比了单个站点的 COSMIC 和探空仪的对流层顶要素偏差随季节的变化, 为使用 COSMIC 掩星资料分析单个站点的对流层顶提供参考.

2 数据和处理方法

2.1 数据

无线电探空仪资料来自美国国家海洋和大气局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的地球系统研究实验室 (Earth System Research Laboratory, ESRL). 它拥有 1946 年至今的美国探测站资料和 1994 年至今的全球测站资料. 该资料主要包括对流层和平流层低层气象要素, 最大探测高度为 100 hPa. 该资料使用温度直减率定义计算对流层顶位势高度, 并提供对应的温度、压力、露点、风向和风速.

COSMIC 是美国国家航空与航天局 (National Aeronautics And Space Administration, NASA) 和台湾空间组织联合发射的掩星系统, 用于观测和获取气象、电离层和气候数据资料. 该任务于 2006 年启动, 拥有 6 颗低轨卫星, 每天产生 ~2000 个掩星廓线, 基本覆盖全球, 数量远高于 CHAMP 和 SAC-C. COSMIC 已经被广泛应用, 如估计大气边界层和电离层资料反演^[13,14], 模拟大气折射率^[15] 以及为大气温度廓线^[16,17] 提供参考. COSMIC 湿廓线资料采用格点分析和短期预报方法从折射指数中分离出大气压力、温度和水汽, 然后将其插值到垂直分辨率为 100 m 的格点上, 高度为 0—39.9 km. 本文使用 2006 年 12 月至 2008 年 11 月的 COSMIC 湿廓线资料和 ESRL 探空仪资料, 其中探空仪资料包含三个站点, 分别是南京 (118.8 °E, 32.0°N)、郑州 (113.6°E, 43.7°N) 和哈尔滨 (126.7°E, 45.7°N).

2.2 方法

世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 根据大气温度直减率定义对流层顶^[18]: 在 500 hPa 等压面之上, 当温度直减率不大于 2 °C/km 的最低高度与其上 2 km 大气内的温度平均直减率不超过 2 °C/km 时, 该最低高度为第一对流层顶 (the first lapse-rate tropopause, LRT1); 在第一对流层顶之上, 如果任意高度与其上 1 km 所有高度之间的平均温度直减率超过 3 °C/km, 根据上述判据确定第二对流层顶 (the second lapse-rate tropopause, LRT2).

设定以单点为中心的矩形, 对选定时间段内所有落入矩形内的 COSMIC 掩星廓线计算对流层顶, 然后使用反距离插值法得到单点的对流层顶要素. 统计第二对流层顶的全球分布时, 将所有掩星廓线的对流层顶要素分为四组, 对应春夏秋冬四个季节, 每个季节包含 6 个月份的掩星数据. 根据坐标经纬度将其划分到地理网格中, 单元网格边长为 5° × 5° (经度 × 纬度), 网格点中心横坐标依次为 2.5°E, 7.5°E, 12.5°E, ..., 357.5°E, 纵坐标依次为 87.5°N, 82.5°N, 77.5°N, ..., 87.5°S, 格点上的值取所在网格的对流层顶要素平均值. 使用 COSMIC 数据计算探空单点的对流层顶时, 时间段以月为单位, 为保证有效的样本数量, 考虑到对流层顶沿经向变化不明显, 将矩形设为 10° × 5° (经度 × 纬度).

3 站点的 ESRL 和 COSMIC 对流层顶要素对比

对于单点观测站的第一对流层顶高度、温度和压力, COSMIC 掩星资料和无线电探空仪较接近, 它们在第二对流层顶差异较大. 图 1 是郑州站 2006 年 12 月至 2008 年 11 月的对流层顶要素图. 郑州站的第一对流层顶高度有明显的季节变化, 冬低夏高, 最大相差 6 km, 第二对流层顶基本不变. COSMIC 的第一对流层顶高度比探空仪平均低 0.44 km; 其第二对流层顶比探空仪平均低 1.29 km, 可能是探空仪在高空分辨率较低导致的系统性偏差. 在夏季和秋季, 探空仪的第一对流层顶升高到 ~15 km 时, 第二对流层顶消失, 但 COSMIC 还可得到出现频率较低 (~20%) 的第二对流层顶, 这可能是 COSMIC 的对流层顶较低造成的. 在 9—20 km 高度范围内, 无线电探空资料只有 7 层, 即标准气压层 300, 250,

200, 150, 100, 70, 50 hPa; 而 COSMIC 有 110 层, 远大于前者的垂直分辨率, 因此可以观测到更加细致的垂直温度变化, 这是两者的高层对流层顶差异较大的一个主要因素.

对于单个站点的对流层顶季节特征, COSMIC 掩星资料与探空仪资料比较接近. 表 1 是 COSMIC 和探空仪在南京、郑州和哈尔滨三个站点的对流层顶偏差的统计结果. 随着纬度增加, 第一对流层顶高度差 (COSMIC-ESRL) 不断减小, 第二对流层顶高度差逐渐增加. 由探空仪资料得到的哈尔滨、郑州和南京第一对流层顶高度的日较差的方差依

次为 1.6, 2.2, 3.9, 第二对流层顶的为 4.4, 1.0, 0.4, 时间为 2006 年 12 至 2008 年 11 月. COSMIC 与探空资料的对流层顶高度的偏差和对流层顶的日变化剧烈程度是正相关. 环流和季风影响着对流层顶日变化, 南京位于亚热带, 常年受季风影响, 附近区域的对流层顶日变化剧烈, 因此单个站点周围的掩星廓线不能准确反映该点的对流层顶变化, 给插值结果带来较大误差. 在高纬, 对流层顶的日变化减小, 通过临近点的插值可以较准确地得到站点的对流层顶要素.

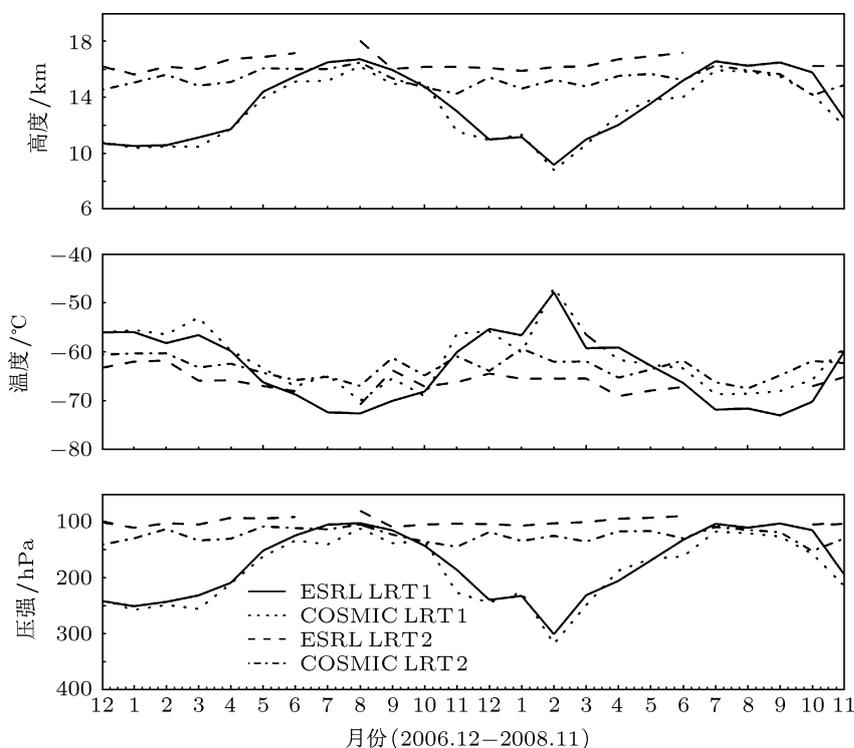


图 1 郑州第一、第二对流层顶高度 (上)、温度 (中) 和压强 (下) 的分布图

表 1 COSMIC 与探空仪的对流层顶要素偏差统计

站点	统计量	高度/km		温度/°C		压强/hPa	
		LRT1	LRT2	LRT1	LRT2	LRT1	LRT2
哈尔滨	平均值	-0.19	-1.72	0.94	2.55	7.75	37.71
	方差	0.03	0.82	0.63	1.48	28.76	363.10
郑州	平均值	-0.44	-1.29	1.88	3.43	12.88	27.01
	方差	0.35	0.21	6.25	2.33	233.50	105.02
南京	平均值	-0.71	-1.05	2.47	4.11	18.29	22.64
	方差	0.23	0.22	3.50	4.17	163.23	122.90

图 2 比较了插值使用的掩星廓线数量和对流层顶偏差 (COSMIC-ESRL) 随季节的变化. 在高纬度, 掩星事件较低纬多, 第一对流层顶偏差小, 第二对流层顶偏差大. 但就同一站点, 掩星事件的多少和偏差没有相关性, 偏差最大的月份掩星事件并不

是最低. 可见, 掩星事件的数量并不能决定单个站点的对流层顶插值精度.

出现频率是反映第二对流层顶状态的一个重要参量, 图 3 反映了三个站点的第二对流层顶出现频率随时间的变化. COSMIC 和 ESRL 的第二对流

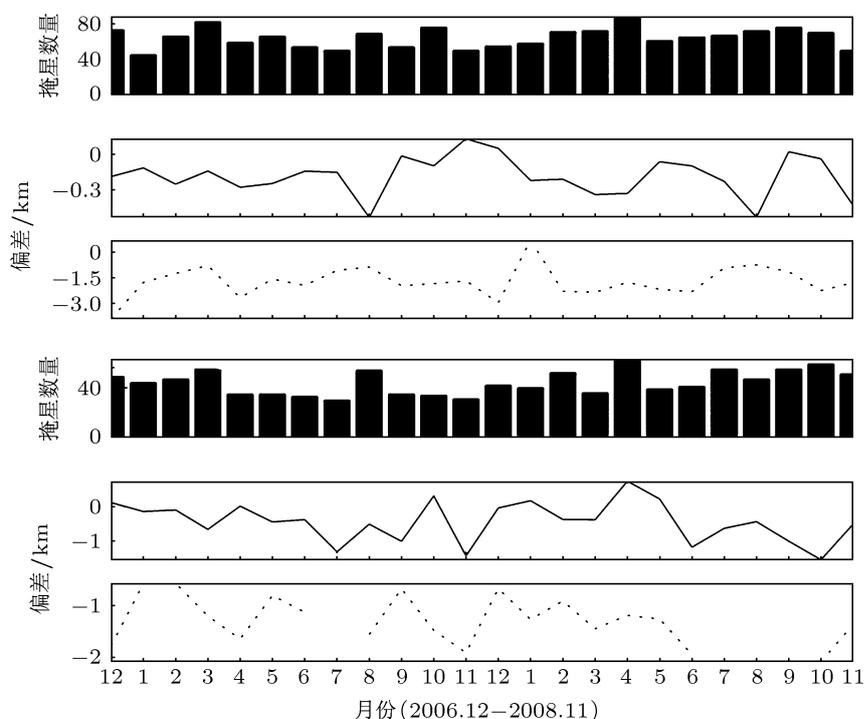


图 2 掩星事件数量和对流层顶高度的偏差 (COSMIC-ESRL) 实线代表第一对流层顶, 虚线代表第二对流层顶, 上三行代表哈尔滨, 下三行代表郑州站

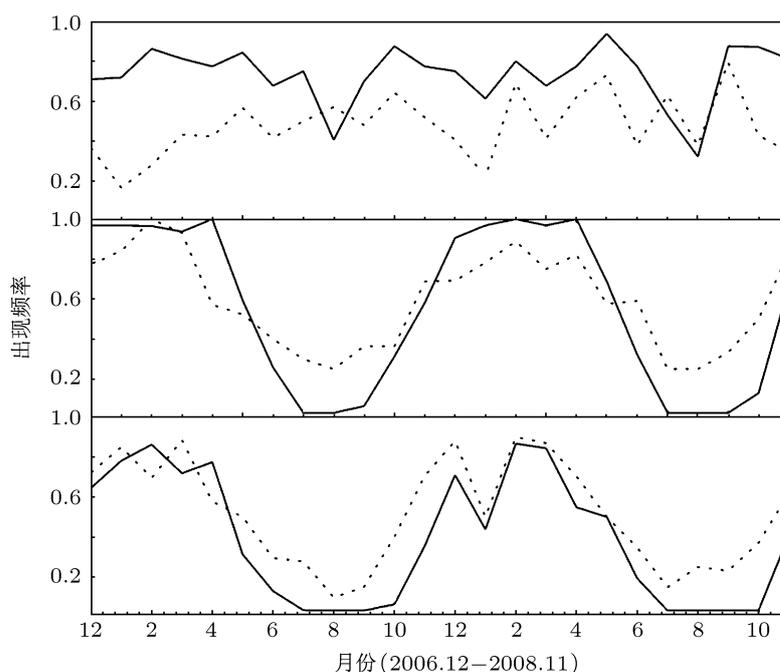


图 3 哈尔滨 (上)、郑州 (中) 和南京 (下) 的第二对流层顶出现频率 实线表示探空仪, 虚线表示 COSMIC

层顶出现频率具有相同变化趋势, 两者的偏差在南京较小, 在哈尔滨较大. Randel 分析美国 Charleston (32°N , 280°E) 站点, 发现 GPS 得到的出现频率比探空仪少, 这和同一纬度上的南京站情况相反. 温度廓线的垂直分辨率精度和局地的天气形势都会影响计算结果. 南京和郑州的第二对流层顶随季节的变化较相似, 在冬季和春季较频繁, 约为 50%—95%, 在夏季和秋季基本消失. 相同月份, 郑州的第二对流层顶出现频率又多于南京, 这和亚热带急流的强弱有关. 由探空仪资料, 哈尔滨的第二对流层顶出现频率全年较稳定, 在夏季最小, 约为 40%, 其他季节为 70% 左右, 这与 COSMIC 的结果趋势相同. 表 2 是三个站点的 ESRL 和 COSMIC 第二对流层顶出现频率的 10 天平均和月平均值的相关系数. 南京和郑州的相关性较好, 哈尔滨的相关性较差. 对于南京和郑州两地, 时间段选取越短, 相关系数越低, 这是由第二对流层顶强烈的日变化造成. 在插值范围内的点与所求位置在对流层顶附近的温度变化上有较大的差异. 由于对流层顶的要素和季节相关, 且同一纬度上又较为相似, 因此可以使用掩星资料做季节分析.

表 2 探空仪 COSMIC 的第二对流层顶出现频率的相关系数

地点	10 天平均	月平均
南京	0.79	0.91
郑州	0.79	0.90
哈尔滨	0.30	0.23

4 第二对流层顶的统计特征

图 4 是存在第二对流层顶的 COSMIC 掩星事件数量分布图. 第二对流层顶大部分出现在中纬度地区, 热带和极区出现较少, 随季节变化显著, 其纬向出现频率分布如图 5 所示. 冬季, 第二对流层顶在 30°N — 45°N 的出现频率是 50%—70%, 在 30°S — 45°S 为 20%—40%. 它在北大西洋上约为 40%, 高于同纬度其他地区, 与大西洋的风暴活动轨迹和气旋有关. 南太平洋东部, 第二对流层顶出现频率为 30%—40%, 这个特征在其他季节和地区是不存在的. 位于热带的东太平洋, 第二对流层顶出现频率为 30% 左右, 呈一个明显的带状分布, 这个

特征在以往的探空仪资料和再分析资料中几乎没有. 印度洋上存在随季节明显变化的第二对流层顶, 频率为 20%—30%.

春季, 第二对流层顶出现频率在北半球减小, 在南半球增多, 北半球总体高于南半球, 这是大气环流造成的. 赤道上的第二对流层顶频率减小. 北大西洋 60°N 附近和印度洋上的第二对流层顶基本消失.

夏季, 北半球中纬度仅在大陆上空存在第二对流层顶, 在北美洲为 $\sim 30\%$, 在亚欧大陆为 30%—50%, 在南半球亚热带为 50%—60%. 阿根廷上的极大值为 70%, 比冬季高出 10%. 印度洋上空的第二对流层顶较其他季节出现频繁, 极大值为 40%. 与冬季北极不同, 夏季南极大陆上存在明显的第二对流层顶, 频率为 50%—60%. 南半球较均匀的纬向分布表明, 第二对流层顶出现频率的大小与下垫面是否是陆地并没有紧密的关系. 季节变换导致的大气环流强弱变化是第二对流层顶季节变化的主要原因.

秋季, 第二对流层顶在北半球中纬度增强, 纬向分布比较均匀, 约为 30%—40%; 在南半球中纬度减弱了 $\sim 10\%$, 而在南极基本消失.

图 6 和图 7 分别是第二对流层顶出现次数和频率的纬向分布. 在热带, 第二对流层顶出现频率基本不随季节变化, 赤道上最大值为 26% (夏季), 最小值是 20% (春季). 从南北回归线到中纬度, 第二对流层顶的出现频率从小于 20% 增加到 60%—70%. 它的最大值所在纬度和副热带急流强弱有关, 在北半球按照冬季、春季、秋季和夏季的次序依次减小, 分别为 69%, 60%, 42% 和 30%, 所在纬度逐渐升高, 冬夏相差 10° 以上. 主要原因在于, 北半球亚热带第二对流层顶出现频率受季风影响较大, 季节变化比高纬度显著. 大陆和海洋之间由于热力作用形成的季风是其主要原因. 在南半球, 由于中纬度大部分是海洋, 不存在随季节变化引起的海陆热力环流, 所以最大出现频率的位置基本不随季节移动. 在北寒带, 第二对流层顶主要出现在冬季. 极区的数据资料较少, 结果可能存在较大误差. 在南半球, 第二对流层顶出现频率的最大值的季节变化为 $\sim 20\%$. 夏季, 第二对流层顶的出现频率从 60°S 的 25% 增到南极的 $\sim 50\%$.

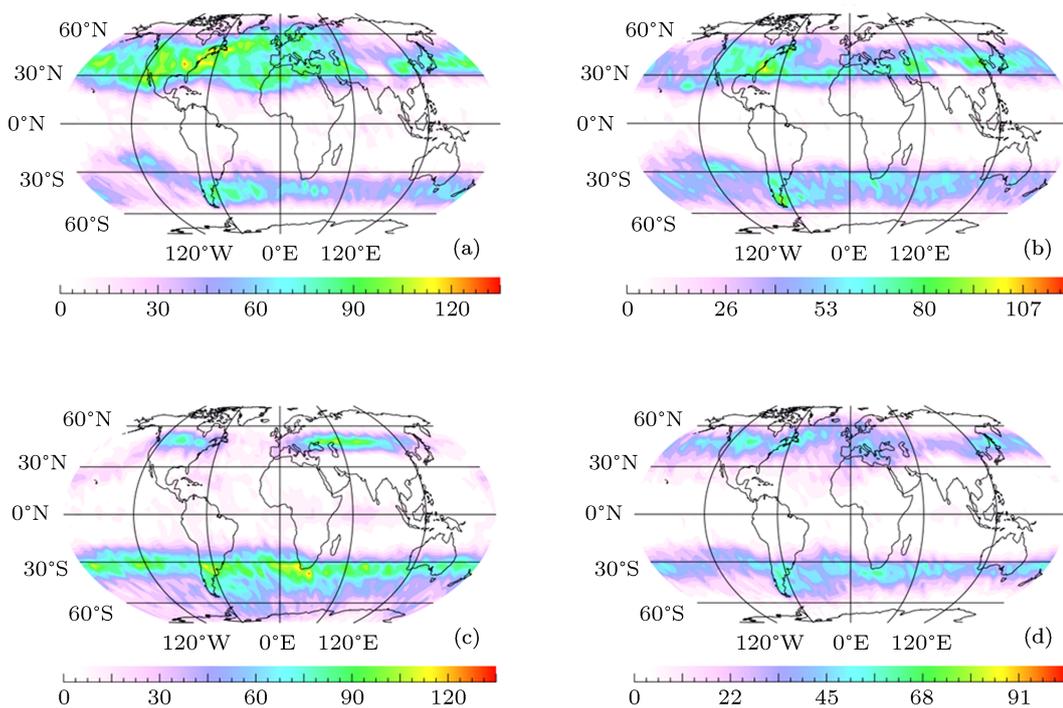


图4 第二对流层顶的出现次数 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

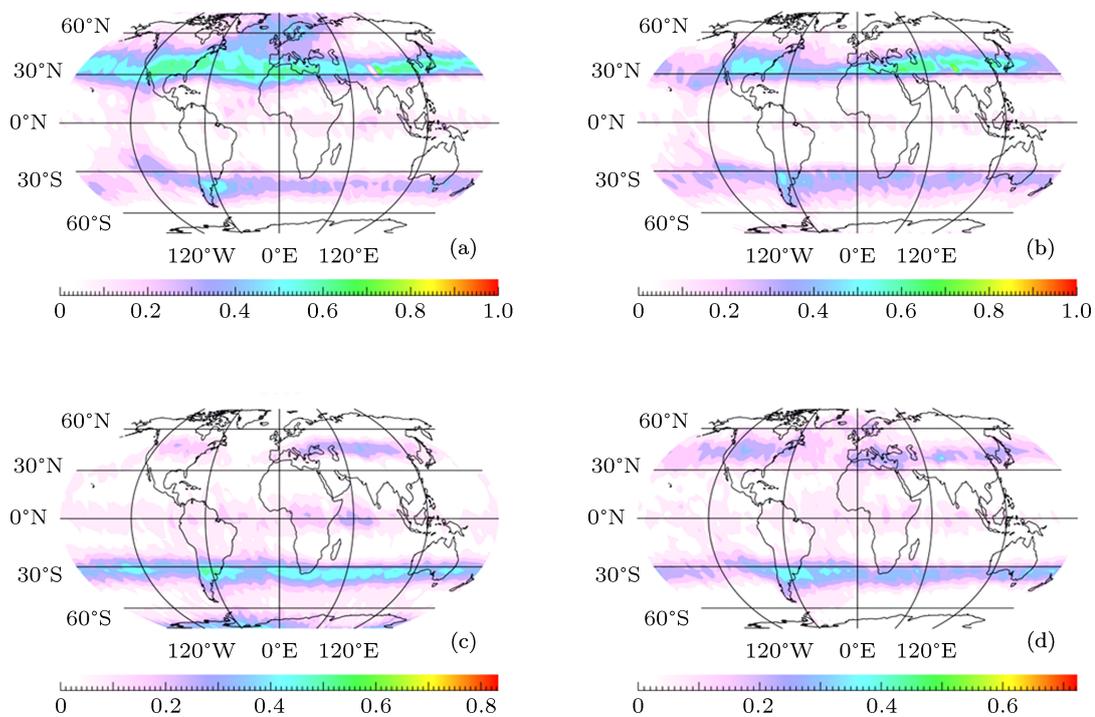


图5 第二对流层顶的出现频率 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

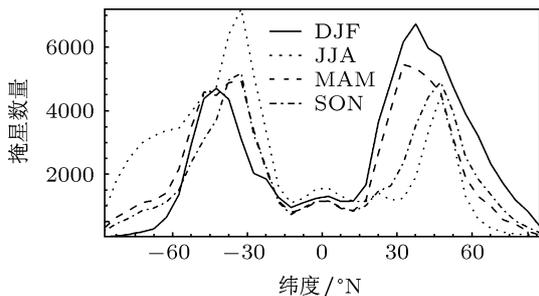


图6 第二对流层顶出现次数的纬向分布

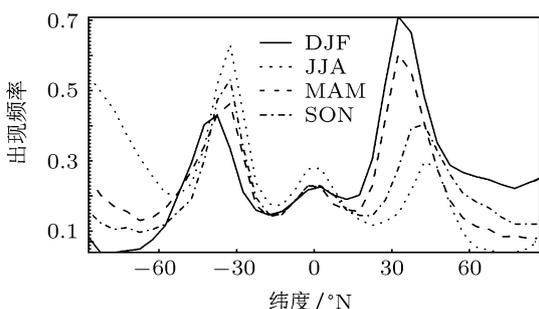


图7 第二对流层顶出现频率的纬向分布

图8和图9是第二对流层顶高度的全球分布图

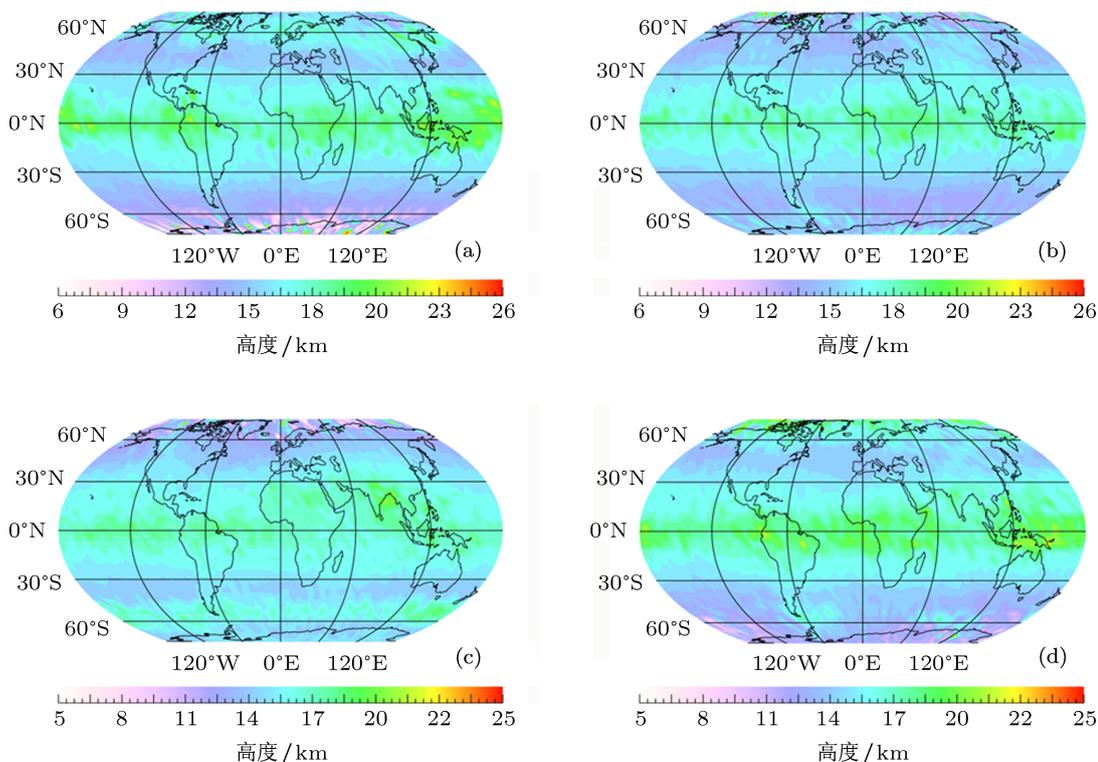


图8 第二对流层顶高度的四季分布图 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

和纬向分布图, 它的纬向分布不均匀, 经向对称性不明显. 在热带, 特别是赤道带, 第二对流层顶的高度是不连续的, 最大高度的季节变化为 18—20 km. 冬季, 它在 45°N 附近有最小值 ~15 km, 并随纬度的增加而升高, 在 60°N 附近达到最大值 ~17 km; 在南半球递减. 夏季, 中高纬度的第二对流层顶高度变化与冬季相反. 图 9 的第二对流层顶高度与 Randel 使用 CHAMP GPS 得出的结果大致相同, 与 Schmidt 的结果差异很大, 这是因为 Schmidt 将第二对流层顶没有出现的地点设为第一对流层顶的高度. 由图 10 和图 7, 出现频率大于 20% 的第二对流层顶在 60° 附近厚度最大, 而 Schmidt 得出最大厚度在 30°—50°.

在热带, 第一对流层顶高度基本水平, 第二对流层顶高度向两侧递减, 在南北回归线附近与第一对流层顶最为接近. 它在中纬度的高度变化与出现频率没有明显的关系, 温带第二对流层顶高度与第一对流层顶的断裂区也没有很好相关性. 在冬季和秋季, 第二对流层顶高度在南半球随纬度增加而减小, 在北半球则是先减小后增加, 最小值在 45°N.

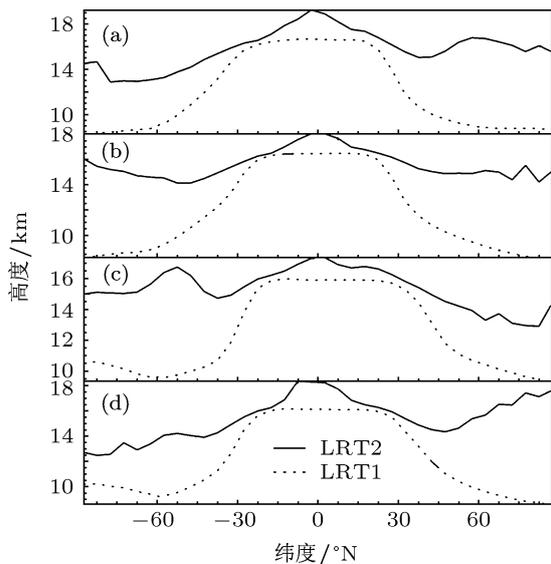
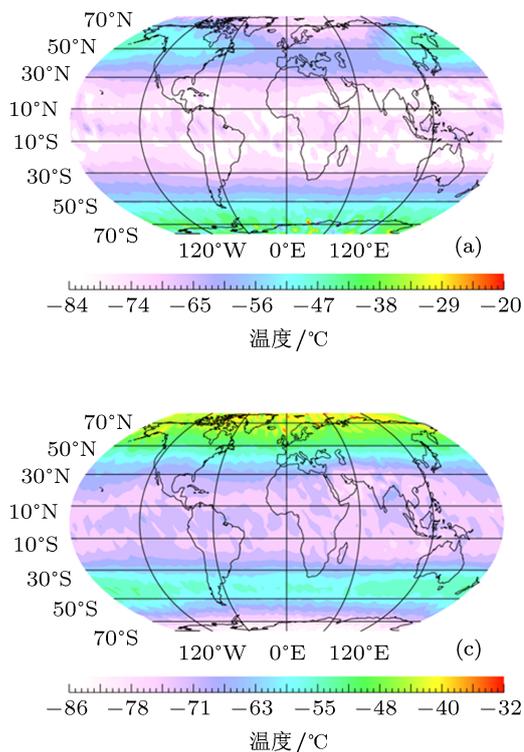


图9 对流层顶的纬向平均高度 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

图 11 是第二对流层顶温度的全球分布图, 在热带最低, 随纬度升高而升高, 在 60° 左右又开始



减小. 冬季, 第二对流层顶温度在 25°N — 35°N 和 10°S — 60°S 之间分布较匀称, 在 40°N — 70°N 的太平洋和加拿大及东亚地区最高, 平均为 -50°C . 60°S 以南的第二对流层顶经向变化剧烈, 起伏较大, 可能是数据较少造成. 夏季, 北半球中纬度的温度减小 $\sim 5^\circ\text{C}$, 纬向分布变得均匀; 40°S 以南的温度比冬季大, 以北比冬季小, 且偏差随纬度增大而增大.

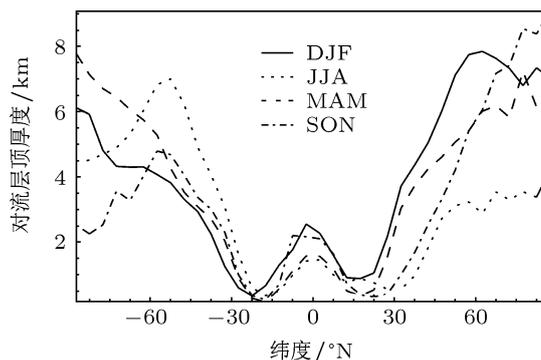


图 10 对流层顶的纬向平均厚度

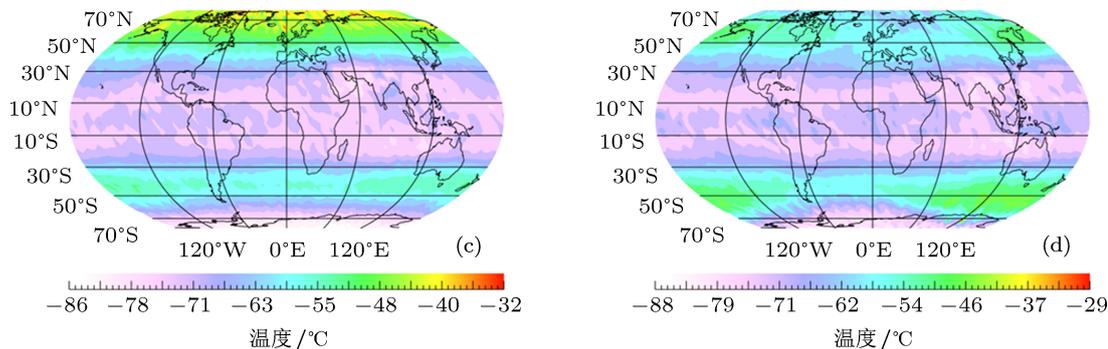


图 11 第二对流层顶温度的分布 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

图 12 是第二对流层顶纬向平均温度分布图. 图中关于第二对流层顶温度有三点值得注意: 1) 最高温度在赤道上, 最低温度在热带边界, 这个特征

与季节无关; 2) 对流层顶的温差 (第二对流层顶温度 — 第一对流层顶温度, 见图 13) 在热带始终大于 0°C , 在温带有时小于 0°C ; 3) 第一对流层顶和

第二对流层顶温差在热带是负相关, 在温带是正相关. 第二对流层顶的出现表明第一对流层顶之上存在明显的逆温, 这通常是由于臭氧强烈吸收短波造成的辐射增温. 当第二对流层顶温度低于第一对流层顶温度时, 水汽等化学物质易向上扩散; 相反, 对流层顶上的逆温会阻止化学物质的交换. 由图 13, 热带第二对流层顶温度较高, 阻止了热带水汽向平流层的输送, 受到阻挡的水汽会水平扩散, 在大气环流的作用下向两极移动, 穿过较低的第一对流层顶, 这是水汽在对流层高处向平流层底部扩散的一个重要方式. 在副热带急流, 对流层顶温差基本小于 0°C .

热带第二对流层顶的出现频率较少, 在垂直分辨率低的资料中出现较少 ($< 20\%$), 使用 COSMIC 数据仍可观测到赤道附近有 20% 以上的第二对流层顶出现. Schmidt 指出越赤道急流的频率和赤道的多对流层顶出现频率相一致. 图 14 是热带对流层和平流层底层的温度廓线, 如果第二对流层顶出现, 其下方一般有逆温, 否则第一对流层顶上的温度将递增. 在热带, 对流层顶上的温度基本由臭氧决定, 它随臭氧含量的稳定增长升高, 温度直减率一般小于 0 . 强烈的对流将微量的毛卷云输送到对流层顶之上, 它打破原有的辐射平衡, 使大气急剧升温 [19,20], 当温度恢复正常时就出现第二对流层顶, 这个高度和毛卷云的厚度有关.

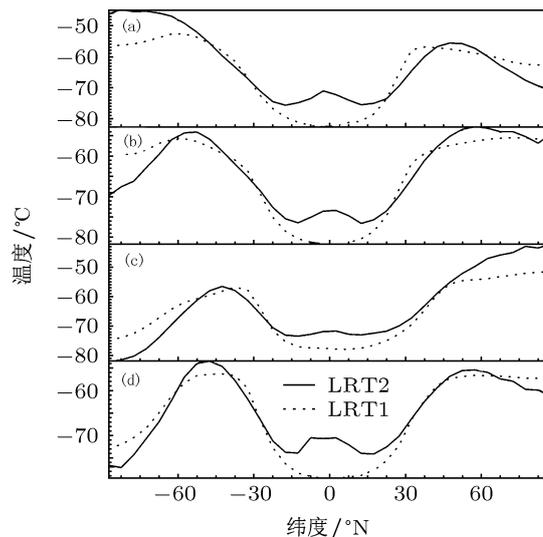


图 12 第二对流层顶的纬向平均温度 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

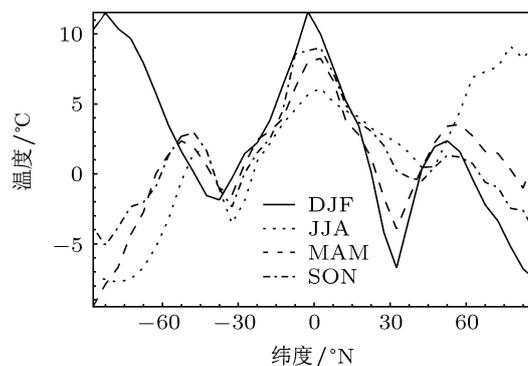


图 13 对流层顶温差的纬向分布

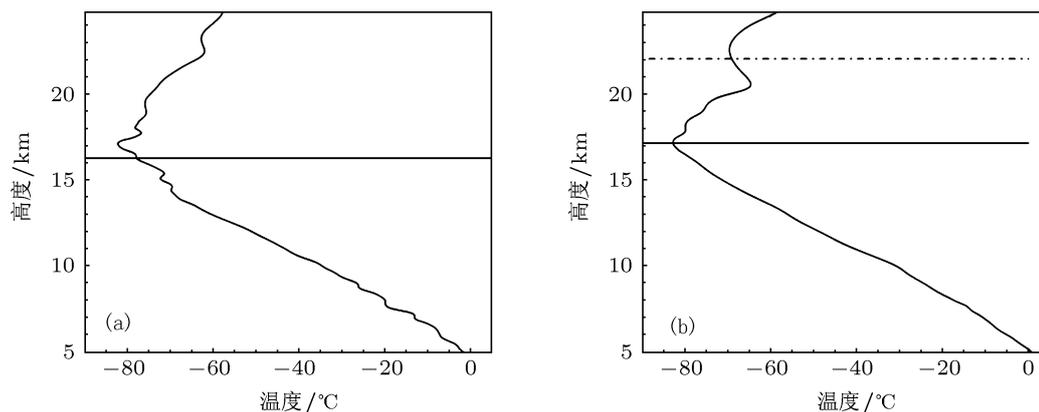


图 14 赤道带只有第一对流层顶的温度廓线 (a) 和有双层对流层顶的温度廓线 (b) 实线表示第一对流层顶, 虚线表示第二对流层顶

5 结论

采用 COSMIC 掩星数据研究局地对流层顶要素月平均特征需要考虑纬度对结果的影响,

COSMIC 对流层顶高度系统性低于探空仪的结果, 两者相差在 1 km 左右. 随着纬度增加, 第一对流层顶高度差不断减小, 第二对流层顶高度差逐渐增加. COSMIC 和 ESRL 的对流层顶的差异与插值

使用的廓线数量无密切联系, 这个特点表明两者的差异是系统性的. COSMIC 和 ESRL 的第二对流层顶出现频率具有相同变化趋势, 两者的偏差在南京较小, 在哈尔滨较大, 这与两者的第二对流层顶高度差随纬度变化类似. 对流层顶的日变化剧烈程度和 COSMIC 与探空资料对流层顶的偏差是正相关.

第二对流层顶的出现频率与季节和纬度有关, 大部分出现在中纬度地区, 热带和极区出现较少. 冬季, 第二对流层顶在 30°N — 45°N 的出现频率是

50%—70%, 在 30°S — 45°S 为 20%—40%, 与 Randel 的结果较一致. 在赤道带, 第二对流层顶出现频率的纬向平均值最高为 26% (夏季), 最低为 20% (春季), 与越赤道急流和对流层顶上的毛卷云有关. 第二对流层顶温度的纬向分布与高度不同, 在南半球分布比较均匀, 在北半球冬季的太平洋北部温度较高, 约 -50°C . 一年中的大部分时间, 副热带急流区的对流层顶温差都小于零.

-
- [1] Randel W J, Seidel D J, Pan L L 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D07309
- [2] Thompson D W J, Wallace J M 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 1297
- [3] Charlton A J, A O'Neill, Lahoz W A, Massacand A C 2004 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **130** 1771
- [4] Santer B D, Wehner M F, Wigley T M L, Sausen R, Meehl G A, Taylor K E, Ammann C, Arblaster J, Washington W M, Boyle J S, Bruggemann W 2003 *Science* **301** 479
- [5] Randel W J, Seidel D J, Pan L L 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D07309
- [6] Anel J A, Antuna J C, de la Torre L, Castanheira J M, Gimeno L 2008 *J. Geophys. Res.* **113** D00B08
- [7] Schmidt T, Beyerle G, Heise S, Wickert J, Rothacher M 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L04808
- [8] Pan L L, Randel W J, Gille J C, Hall W D, Nardi B, Massie S, Yudin V, Khosravi R, Konopka P, Tarasick D 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D10302
- [9] Hall C M, Hansen G, Sigernes F, Kuyeng Ruiz K M 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 5485
- [10] Elbern H, Hendricksand J, Ebel A 1998 *Theor. Appl. Climatol.* **59** 181
- [11] Baray J, Daniel V, Ancellet G 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 353
- [12] Sprenger M, Maspoli M C, Wernli H 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 8518
- [13] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S V, Lenschow D H 2011 *J. Atmos. Sci.* **68** 1703
- [14] Xu X S, Hong Z J, Liu R J, Guo P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2163 (in Chinese) [徐贤胜, 洪振杰, 刘荣建, 郭鹏 2010 物理学报 **59** 2163]
- [15] Wu Y Y, Hong Z J, Guo P, Zheng J 2010 *Chinese J. Geophys.* **53** 1085 (in Chinese) [伍亦亦, 洪振杰, 郭鹏, 郑杰 2010 地球物理学报 **53** 1085]
- [16] Wang Z H, Wang Z, Kang S F, Zhang Y S, He X J 2010 *Chinese Journal of Radio Science* **25** 913 (in Chinese) [王振会, 王喆, 康士峰, 张玉生, 赫晓静 2010 电波科学学报 **25** 913]
- [17] Wei M, OuYang S C 2011 *Engineering Sciences* **13** 49 (in Chinese) [魏鸣, 欧阳首承 2011 中国工程科学 **13** 49]
- [18] World Meteorological Organization (WMO) 1957 *WMO Bull. Geneva, Switzerland* **1957** 134
- [19] Mcfarquhar G M, Andrew J 2000 *J. Atmos. Sci.* **57** 1841
- [20] Cheng T H, Gu X F, Chen L F, Yu T, Tian G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5323 (in Chinese) [程天海, 顾行发, 陈良富, 余涛, 田国良 2008 物理学报 **57** 5323]

Global characteristics of the double tropopause derived from the COSMIC radio occultation data*

Jiang Yu Sheng Zheng[†] Shi Han-Qing

(*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 2 July 2012; revised manuscript received 22 August 2012)

Abstract

The global distribution of the second lapse-rate tropopause (LRT2) is investigated with the radio occultation measurements from the constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate (COSMIC) covering December 2006–November 2008. Comparisons between COSMIC and radiosonde in terms of the tropopause are examined in three stations to check the difference. The research results are as follows. 1) In the winter, occurrence frequency for LRT2 in the northern hemisphere (NH) is of 50%–70% and in the southern hemisphere is of 20%–40%. 2) The second tropopause over the equatorial zone with 20%–26% occurrence seems to be related to the equatorial jet stream and subvisual cirrus above the first tropopause. 3) In the tropic, the difference in altitude and occurrence between the first and second tropopause decrease with latitude. In the extratropic zone, the difference increases with latitude and reaches a maximum of 7–8 km in the winter of the NH. 4) The second tropopause occurs frequently over the subtropical jet stream region, in which the first tropopause temperature is almost higher than the second one. 5) The more intense the single station daily variations of tropopause height, the bigger the difference between COSMIC and radiosonde is.

Keywords: the second tropopause, COSMIC, occurrence frequency, difference

PACS: 92.60.hf, 93.85.Pq

DOI: 10.7498/aps.62.039205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41105013), the Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2011122) and the Open Research Program of State Key Laboratory of Space Weather, China (Grant No. 201120FSIC-03).

[†] Corresponding author. E-mail: 19994035@sina.com