

磁层磁场模式的研究进展

张晓芳¹, 严卫¹, 符养²

(1. 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘要 磁场模式是表述空间磁场的一种有效工具, 对于研究磁层大尺度电流系的发展变化和辐射带粒子具有重要意义. 本文介绍了三种主要的磁层磁场模式, 即经验模式、抛物面模式和事件导向模式, 结合模式的原理和特点, 对模式的改进情况和性能检验进行了详细论述, 并对三种模式进行了对比分析. 三种模式都能对暴时磁场进行动态模拟. 最近的 Tsyanenko 模式考虑了太阳风的历史作用, 每个磁场源都有自己的松弛时间尺度及驱动函数; 抛物面模式 A01 中增加了场向电流及窄尾流效应; 事件导向模式 G03 增加了非对称环电流和局地窄尾流片效应.

关键词 磁层磁场, 经验模式, 抛物面模式, 事件导向模式

中图分类号 P318

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)06-1754-06

Advances in studies on magnetospheric magnetic field models

ZHANG Xiao-fang¹, YAN Wei¹, FU Yang²

(1. Meteorology Institute, PLA Science and Technology University, Nanjing 211101, China;

2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China)

Abstract Magnetic field model is a very useful tool not only for the representation of the magnetic field, but also for studies of the evolution of the large-scale currents, and for studies of the radiation belt particles. With the principle and characteristic of models, this paper presents three different magnetospheric magnetic field models: the empirical, the paraboloid and the event-oriented models, dwelling on not only estimating the accuracy of models but also comparing models with one another, in addition to improvement of models. All these models can model the dynamic magnetic field during storms. The latest Tsyanenko model takes into account the prehistory of the solar wind, in which each source of the magnetic field has its own relaxation timescale and a driving function. The paraboloid model A01 takes into account effects of field aligned currents and thin tail current. And an additional localized thin current sheet and asymmetric partial ring current are introduced into the event-oriented model G03.

Keywords magnetospheric magnetic field, empirical model, paraboloid model, event-oriented model

0 引言

地磁场是各种不同来源磁场的总和. 通常人们测量的近地磁场是地核及地壳的内源磁场, 以及磁层及电离层电流所导致的外源磁场的叠加. 六个地球半径(R_E)以外, 磁场主要的形变来自磁层电流系. 磁场模式是表述磁场的一种有效工具, 由于磁层磁场直接控制等离子体运动, 因而磁层磁场模式对于研究磁层大尺度电流系的发展变化^[1], 研究辐射带的粒子运动都有重要意义^[2].

由于地球外源磁场变化复杂, 很难建立反映其

瞬时情况的外源场模型, 过去的磁层磁场模式多是建立在一定扰动条件下的平均模型. 近些年随着观测资料的丰富, 以及人们对磁层内部结构机制的深入了解, 磁层磁场模式的研究工作, 无论是经验模式还是物理模式都取得了很大进步.

当前用于计算磁层磁场的模式, 包括建立在大量观测数据上的经验模式, 以及主要以物理规律为依据, 建立于数学方程基础上的理论模式. Jordan (1994) 曾对当时的磁层磁场模式进行了总结^[3], 详细讨论了几个当时被广泛应用的经验模式, 包括 Mead-Fairfield、Olson-Pfitzer (OP)、Tsyanenko-

Usmanov 和 Hilmer-Voigt (HV) 等模式,对此本文将不再赘述。以下从模式原理、特点、应用情况和模式间性能对比等方面,主要对当前广泛应用的 Tsyganenko 经验模式,作为国际标准化组织 (ISO) 当前标准模式的抛物面理论模式,以及能对特定条件下的磁层结构进行精确表述的事件导向模式进行分别介绍。

1 Tsyganenko 经验模式

经验模式以统计数据为基础,从理论上讲,大量卫星资料能够实时监测磁场结构并使其可视化。把这些资料结合适当的公式和算法可使得磁层动态电流系重构,重现接近实际变化的全球磁场。建立于实验飞船平均资料上的早期经验模式(如 T87 和 T89)可以进行实时计算,可以描述平静时期磁层磁场的主要特征,却不能表述磁场的动态变化,尤其是扰动时期的磁场变化。它们的参数通常都是非物理性的,不能随着快速变化的磁层环境而变化。相对的,改进后的 T96、T01 和 T04 模式,考虑了更加复杂的磁层物理过程,能够表述暴时磁场的动态变化。目前 Tsyganenko 经验模式已经被广泛应用于科学研究及空间天气业务系统,然而其只能利用全球参数调整磁场结构,即使能获得局部地区的磁场测量资料也不能作为模式的输入。

1.1 经验模式三要素

建立一个经验模式主要包含以下三个关键的任务:

(1) 收集大量的空间磁强计资料、同时刻的太阳风状态以及地磁活动指数资料。过去空间探测器在不同的位置、季节、太阳周期阶段及不同的扰动情况收集了大量的相关资料。但是前 20 年中的观测资料覆盖面仍然不足,而且大部分的资料来源于平静及平均扰动时期,在太阳风的特殊状态时期却缺失了。目前随着越来越多的探测卫星上天,这种情况有了很大改善。如 Geotail 卫星提供了极好的尾流等离子体片投影资料;Polar 卫星由于其高倾角的轨道,从而极大丰富了高纬度探测资料,其中包括极盖区及 Birkeland 电流区域。

(2) 对全球范围的磁场进行适当的数学表征,通过数学处理把不同的磁场源作为单独的项表示。近地球表面 ($R \leq 6 R_e$), 内源磁场起着控制作用,其数学表述简单明了。而相应的外源磁场情况多变,且结构复杂,受控于磁层等离子体,一般是通过大量模块来表述外源磁场,每一模块代表一个独立的磁场源。

(3) 建立最优算法,对模式进行参数化。即找到一个函数关系或者算法把磁场源强度及空间结构与输入参数(包括太阳风状态、行星际磁场 (IMF) 和地磁活动指数等)联系起来。

如上所述,对磁层经验模式的改进也应该着重于以上三个方面的工作,即重建拓展数据库,改进外源场的数学表述,以及最优模式参数化。

1.2 模式发展

Tsyganenko 系列模式主要用来描述磁层感应电流系所产生的磁场,其中没有考虑电离层感应电流,当前主要包括 T89, T96, T01, T04。过去对磁层磁场的描述主要有镜像偶极子 & 电流片法及源表面模拟。T96 模型在很大的程度上继承了源表面模式的优点,同时对其不足进行了改进:引入太阳风参数;输入参数中 D_s 指数替代了 T89 中的 K_p 指数,使得时间分辨率由原来的三小时提高到一小时;引入了清楚定义的磁层顶,对于环电流和尾流的描述也更加合理;磁场与 IMF 间的联系也被考虑在内,从而产生了开磁层结构;T96 模式也是第一次引入了 I & II 区 Birkeland 电流。然而 T96 仍然存在不足,尤为突出的是由于环电流的过于简化而导致内磁层过于伸展,在强扰动环境时尤为明显。

不断改进的经验模式被广泛应用于低纬及远磁尾间磁场线投影的研究中。近些年的研究工作利用改进的数学方法及新增的观测资料,曾分别对亚暴电流楔^[4]、远极尖区^[5]、远磁尾^[6]和内磁层^[7]等区域的磁层磁场进行了研究。然而,大部分此类模式中所用的资料,暴时观测都被大量平静时期的资料淡化了。而且对于动态发展的磁暴来说,不仅行星际介质的当前状态很重要,而且事件发生前 1~3h 内的历史状态也是很重要的。而大部分模式中,行星际介质的历史效果都被忽略了,仅仅用太阳风及 IMF 的当前状态作为太阳风驱动作用的表征函数。

在 T01^[8,9]中引入了函数 G_1, G_2 作为尾流场参数化项,从而考虑了太阳风的历史作用。同时 T01 中还包含了部分环电流项,建立了新的尾流和场向电流表述方法。Tsyganenko(2003)利用 T01 作为内磁层磁场模式,结合 1996-2000 年间 37 个主要磁暴事件中的空间磁强计资料及同时刻的太阳风、IMF 资料对内磁层磁场的暴时变形进行了成功模拟^[10]。但是此工作的一个重要不足就是假定了所有的电流以相同的方式响应于外部驱动,其重构时间尺度大体上与其衰减时间尺度相同。实际上这是不正确的,对称环电流需几小时重构而衰减需要数小时或者几

天,部分环电流、越尾电流及 Birkeland 电流反应得更快. 另外一个不足之处是对太阳风的地球驱动效应参数的选择带有偶然性,并没有对太阳风参数和 IMF 的其它组合方式进行试验.

针对以上不足, Tsyanenko(2005)提出了一个由上行太阳风驱动的暴时内磁场模式^[11],即 T04. 此模式以一种更精确、更具有物理连续性的方法,通过对太阳风和 IMF 参数的更佳组合,从而使磁场的每个源具有自己的松弛时间尺度及驱动函数. 通过此模式能从资料中提取出磁暴期间磁层电流系的时间变化信息,克服了以前模式主要侧重于研究远地磁场空间结构的不足. 然而,此模式也存在不足. 如 Thomsen(2003)指出,磁暴的大小不但取决于当前的驱动源大小,还与磁层的“预处理”有关^[12],而 T04 对于磁暴前磁层的初始状态,假设外部驱动的效能仅仅与太阳风和 IMF 的当前状态有关,忽略了磁暴前状态的作用. 同时, T04 不包含亚暴效应,不能描述并预报磁场的爆发重构,以后的模式中需对此加以改进.

1.3 模式性能检验

经验模式建立于大量的观测数据基础上,在应用经验模式研究同一问题时,由于获得数据的方法不同、数据量不同以及所采用的公式不同,采用不同的经验模式往往会得到不同的结果,必须要考虑到模式间的区别,对模式性能进行对比检验,从而选择适用的模式.

例如, Jordan(1992)曾利用 CRRES 资料对 OP77、OP88、T89 和 HV 等不同系列的模式进行检验评估^[13],结果表明只有 HV 模式能定义等离子体片内边界的位置,从而是最适用的模式. 而 Woodfield(2006)把 Cluster II 卫星的实测磁场与 Tsyanenko 系列模式 T89、T96 和 T01 的模拟结果进行了对比^[14],结果表明,在 D_s 为 $-40 \sim 0$ nT 的情况下,对于大部分区域,所有模式都描述良好,各自之间没有太大的差异. 而在近地点,不管是日侧还是夜侧,所有模式结果,尤其是环电流都有很明显的偏离,改进后的模式没有表现出明显的优越性,因此需要扩展资料从而进一步检验不同条件下的模式性能. Huang(2006)为了解暴时内磁层磁场及等离子体的结构及动态变化,把 T96、T01 和 T03 的磁场模拟结果与全球 LFM MHD 模式结果以及 GOES 卫星资料进行了对比^[15],结果表明,早期的 T96 和 T01 不能正确模拟特大磁暴期间的磁场强度值,而改进后的 T03 模拟效果最好.

2 抛物面模式

Alexeev 的抛物面模式 A01^[16] 是 ISO 当前的标准磁场模式. 磁层顶电流、环电流和尾流是磁层磁场的主要影响源,抛物面模式建立在这些大尺度电流系拉普拉斯方程的解析解基础上,磁层顶被设置为旋转抛物面形状.

2.1 模式特点

抛物面模式是动态的,根据所获得实验资料的时效性,模式可以实时或者近实时的运行;从磁静日到强地磁暴时期,模式可以在地磁指数的整个范围内运行;同时模式适用于整个磁层范围.

抛物面模式的一个重要特征就是把磁层电流系(强度及位置)作为自身的时间相关参数描述相应的感应磁场,时间相关参数由太阳风、极光卵和磁指数(AL 和 D_s 指数)等实验数据确定,用于解析定义时间相关参数的子模式可以根据使用者的情况适当调整. 然而由于抛物面坐标奇点问题,抛物面模式不能计算 OX 轴上的磁场,也不能计算 $Y=0$ 平面的磁场线;模式中未包含 II 区场向电流及部分环电流;模式尽管考虑了渗入磁层内的 IMF 效应,并没有考虑到磁鞘磁场.

2.2 模式发展与性能检验

最近几年,抛物面模式被应用于计算环电流、磁尾电流和磁层顶电流对于 D_s 指数的影响,分析暴时磁层电流系的动态发展^[17,18];还被应用于研究横跨开磁场线的位势降^[19]和磁暴期间的磁层能量收支^[20]等方面;同时抛物面模式在磁静日和磁扰动条件下的计算结果,分别与实测资料和其它模式结果进行了比较,模式性能得到了充分的检验^[21~23].

根据抛物面模式 A99 的模拟结果与覆盖了 $4 \sim 60$ Re 范围的实测资料的比较分析^[16],发现在磁层的不同区域,模式计算的磁场分布与实验资料总体符合得很好. 然而,模式计算的近地 10 Re 内的晨向磁场高于实测值,而在昏向刚好相反,即模式结果偏低,这可能是由于在 A99 中并不包括场向电流,同时由于 A99 中的尾流极窄,模式无法计算尾流等离子体区域的近零点磁场附近的值. 而改进后的 A01 模式加入了场向电流及窄尾流效应. 根据磁层不同部位磁场的实测数据与 A01、A99、T96 模拟结果的对比分析,发现抛物面模式的模拟结果与大量实测数据吻合,几乎与 T96 模式具有相同的精确性,并且改进了尾流及场向电流参数化方案的 A01 比 A99 模拟效果更好.

抛物面模式可以应用于磁扰动期间^[17~23]. Alexeev(2001)利用 A99 模式研究了磁层扰动期间磁层电流系的动态变化^[17],同时为了估计模式结果的精确性,将 A99 模式的模拟结果分别与地球同步轨道卫星 GOES-8/9 观测结果进行了比较. 结果发现,在太阳风等离子体云与磁层相互作用期间,A99 对于地球表面及地球同步轨道的磁场变化描述良好,磁层动态变化依赖于所有的磁层磁场源,这些磁场源大小量级相当. Turner(2000)曾利用 T96 对同一个例进行了模拟分析^[24],由于在 T96 中忽略了与亚暴活动所导致极光卵扩张相一致的尾流内边界动力学,因而在研究不同电流系对 D_s 指数的影响时,与 Alexeev 的结果有所不同. 反映大尺度电流系动力学的的能力是衡量模式性能及其适用性的重要标准,T96 不能正确定义每个大尺度电流系的时间相关性,因而 T96 的适用条件有限. 实际上用来确定 T96 模式的磁场资料大部分对应太阳风动压为 0.5~10 nPa, D_s 为 -100~+20 nT,因而模式输入参数不能超出上述范围,在磁暴的强扰动时,T96 模式已不再适用.

3 事件导向模式

全球模式能很好地描述磁层磁场的主要特征,但在描述磁场时局地特征时却存在分歧,而很多研究都需要对磁层结构进行精确的表述. 在这种情况下,可以应用事件导向模式来提高对于特定事件的计算精确度. 事件导向模式,建立于具体事件平均观测资料的基础上,用来模拟此事件的发生发展过程. 以下主要介绍有关 Ganushkina 等发展的暴时动态磁场模式.

3.1 模式特点

Ganushkina 暴时磁场模式以 T89 作为基础,而其环电流、尾电流和磁层顶电流则经过修正从而能更好的适应实际观测. 模式思想来源于 Pulkkinen(1992)利用一系列线性变化的参数值模拟了持续 1~2h 的典型单个亚暴相^[25],而 Ganushkina 模式模拟了持续 24h 以上的磁暴^[26~29]. 在每个时间段,Ganushkina 模式中所包含的自由参数根据实时观测资料计算得到. Ganushkina 模式由一“豆形”环电流取代了 T89 中的环电流. 改进后的 G03^[30,31],除了对称环电流,同时考虑了具有闭合 II 区场向电流系的非对称环电流;模式中加入了局地窄尾流片从而解释了在亚暴期间的磁尾变化;模式还调整了磁层顶电流从而使其与太阳风动压的强变化相适

应.

3.2 模式性能检验

事件导向模式对于全球模式的性能检验及改进有重要作用. Ganushkina(2002,2004,2005)利用 G02 和 G03 模式对强磁暴及中等磁暴时的磁场进行了成功的模拟,并与经验模式和抛物面模式进行了性能对比,研究了磁暴期间磁层大尺度电流系的动态发展,给出了暴时环电流与尾流的关系^[26~31].

利用 G03 对三个中等磁暴和一个强磁暴进行模拟^[30],结果发现,G03 很好地重现了暴时电流系和磁场的大尺度变化,而小尺度的变化需要引入此模式中所不包含的局地电流系. 同时模式很好地重现了 GSM(Geocentric Solar Magnetospheric System,地心太阳磁层系)坐标系下的 B_z 分量和 D_s 指数,与 G02 相比,窄尾流片的引入使模式结果与观测资料更加相符.

利用 G03、T01 和 A01 分别对一个中等磁暴和一个强磁暴进行模拟分析^[31],并把模式结果与 GOES-8/9/10、Polar 和 Geotail 卫星观测结果进行比较,从而估计模式的可靠性. 结果发现,与 Polar 的观测磁场相比,三个模式结果显示了近似一致的精确性,G03 的结果比 A01 和 T01 更好一点. 在任何扰动条件下,A01 模式都很好地重现了 GOES 和 Polar 所测的磁场 B_x 分量,但是 B_z 分量偏低,这是由于尾流模式的特征造成的,也可能是由于在 A01 模式中缺少部分环电流模式. T01 模式的 B_x 结果与观测结果也十分相符,但在强磁暴的极值时,模式的 B_z 值与沿着 GOES 和 Polar 轨道的观测结果相比低很多,主要是由于强磁暴在资料库中仅仅是一小部分,造成了对尾流的过高模拟. G03 模式在中等磁暴和强磁暴时都给出了与亚暴相关的 B_z 分量变化,对于 GOES 和 Polar 所测 B_z 变化的描述具有更高的精确性,但是对于最强磁暴时的 B_x 变化模拟有更大误差. 而对于沿 Geotail 轨道磁尾电流片附近的局地磁场变化,三个模式的结果都不足够准确.

4 结 语

磁层磁场是一个重要的物理参数,对其进行准确深入的研究具有重要意义. 然而空间范围巨大,无论是实地探测还是遥感探测,都无法覆盖整个空间,因而建立准确可行的模式是非常必要的. 本文对三种主要的磁层磁场模式分别进行了介绍,对其应用发展和模式性能等内容进行了比较分析,总结如下:

(1)随着探测数据的增多,数学参数化方法的改

进, Tsyganenko 模式已发展成可以模拟暴时扰动磁场的动态模式. 最近的 T04 模式中考虑了太阳风的历史作用, 模式中的每个磁场源以不同的方式响应于外部驱动, 模式能够很好的模拟中等磁暴磁场, 然而模式中仍然不包含亚暴效应, 所用资料中的强磁暴资料也有限, 因而模式对于强磁暴的模拟结果仍有差距.

(2) 抛物面模式可以模拟任何扰动条件下的全球磁场, 改进的 A01 模式加入了场向电流及尾流效应, 模式中不包含部分环电流及 II 区场向电流.

(3) 事件导向模式是对全球模式的一个重要补充, 改进后的 G03 加入了非对称环电流及局地窄尾流片效应, 调整了磁层顶电流, 模式能够给出特定条件下精确的磁场表述.

总之, 上述三种模式都能对暴时的磁场进行动态模拟, 但各模式建立基础不同, 所用数据不同, 对于不同的内容, 模式效果可能也不一样, 因而我们在具体应用时应考虑到模式特点, 选择最合适的磁场模式.

致 谢 我们对刘松涛同志的帮助表示衷心的感谢.

参 考 文 献 (References):

- [1] 沈晓阳, 陈鸿飞. 磁层顶压缩事件的磁场分析[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 320~327.
- [2] 曹晋滨, 燕春晓, 刘振兴. 磁壳参数 L 与磁暴 Dst 指数和行星际条件的关系[J]. 空间科学学报, 2004, 24(2): 89~95.
- [3] Jordan C E. Empirical models of the magnetospheric magnetic field [J]. Rev. Geophys., 1994, 32(2): 139~158.
- [4] Tsyganenko N A. An empirical model of the substorm current wedge [J]. J. Geophys. Res. 1997, 102(A9): 19935~19942.
- [5] Tsyganenko N A, Russell C T. Magnetic signatures of the distant polar cusps: Observations by Polar and quantitative modeling [J]. J. Geophys. Res. 1999, 104(A11): 24939~24956.
- [6] Tsyganenko N A. Solar wind control of the tail lobe magnetic field as deduced from Geotail, AMPTE/IRM, and ISEE 2 data [J]. J. Geophys. Res. 2000, 105(A3): 5517~5528.
- [7] Tsyganenko N A. Modeling the Inner Magnetosphere: The Asymmetric Ring Current and Region 2 Birkeland Currents Revisited [J]. J. Geophys. Res. 2000, 105(A12): 27739~27754.
- [8] Tsyganenko N A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1. Mathematical structure [J]. J. Geophys. Res., 2002, 107(A8), 1179, doi: 10.1029/2001JA000219.
- [9] Tsyganenko N A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations [J]. J. Geophys. Res., 2002, 107(A8), 1176, doi: 10.1029/2001JA000220.
- [10] Tsyganenko N A, Singer H J, Kasper J C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(A5), 1209, doi: 10.1029/2002JA009808.
- [11] Tsyganenko N A, Sitnov M I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms [J]. J. Geophys. Res., 2005, 110(A03208), doi: 10.1029/2004JA010798.
- [12] Thomsen M F, Borovsky J E, Skoug R M. Delivery of cold, dense plasma sheet material into the near-Earth region [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(A4), 1151, doi: 10.1029/2002JA009544.
- [13] Jordan C E, Bass J N, Gussenhoven M S. Comparison of magnetospheric magnetic field models with CRRES observations during the August 26, 1990, storm [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97(A11): 16907~16920.
- [14] Woodfield E E, Dunlop M, Holme R. A statistical comparison of Cluster magnetic data with the Tsyganenko 2001 model [A]. In: 36th COSPAR Scientific Assembly [C]. Beijing, China: 2006, 2385.
- [15] Huang C L, Spence H E, Lyon J G. Storm Time Configuration of the Inner Magnetosphere: Lyon-Fedder-Mobarry MHD code, Tsyganenko model, and GOES observations [J]. J. Geophys. Res., 2006, 111(A11S16), doi: 10.1029/2006JA011626.
- [16] Alexeev I I, Kalegaev V V, Lyutov Y. The ISO standard for the Earth's magnetospheric magnetic field model [A]. In: 35th COSPAR Scientific Assembly [C]. Paris, France: 2004, 3318.
- [17] Alexeev I I, Kalegaev V V, Belenkaya E S. Dynamic model of the magnetosphere: Case study for January 9~12, 1997 [J]. J. Geophys. Res., 2001, 106(A11): 25683~25694.
- [18] Clauer C R, Alexeev I I, Belenkaya E S. Special features of the September 24~27, 1998 storm during high solar wind dynamic pressure and northward interplanetary magnetic field [J]. J. Geophys. Res., 2001, 106(25), 25695~25711.
- [19] Alexeev I I, Belenkaya E S, Clauer C R. A model of region 1 field-aligned currents dependent on ionospheric conductivity and solar wind parameters [J]. J. Geophys. Res., 2000, 105(A9): 21119~21128.
- [20] Feldstein Y I, Dremukhina L A, Levitin A E. Energetics of the Magnetosphere during the Magnetic Storms [J]. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2003, 65(4): 429~446.
- [21] Alexeev I I, Feldstein Y I. Modeling of geomagnetic field during magnetic storms and comparison with observations [J]. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2001, 63(5): 431~440.
- [22] Feldstein Y I, Levitin A I, Kozyra J U. Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24 - 27 September 1998 major magnetic storm [J]. J. Geophys. Res., 2005, 110(A11214), doi: 10.1029/

- 2004JA010584.
- [23] Kalegaev V V, Ganushkina N Y. Global magnetospheric dynamics during magnetic storms of different intensities [J]. *Geophys. monogr.*, 2005, 155(20): 293~300.
- [24] Turner N E, Baker D N, Pulkkinen T I. Evaluation of the tail current contribution to Dst [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(A3):5431~5440.
- [25] Pulkkinen T I, Baker D N, Pellinen R J. Particle scattering and current sheet stability in the geomagnetic tail during the substorm growth phase [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 19283~19297.
- [26] Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, Kubyshkina M V. Storm time ring current magnetic field modeling during May 15, 1997 event[J]. *Adv. Space Res.*, 2002, 30(10):2175~2180.
- [27] Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, Kubyshkina M V. Modeling the ring current magnetic field during storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (A7), 1092, doi: 10.1029/2001JA900101.
- [28] Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, Kubyshkina M V. Comparative study of magnetospheric configuration changes during May 2, 1998 moderate storm and May 4, 1998 intense storm events [A]. In: Winglee R M, ed. *Proceedings of Sixth International Conference on Substorms [C]*. University of Washington, Seattle; 2002, 483~488.
- [29] Ganushkina N Y, Pulkkinen T I. Particle tracing in the Earth's magnetosphere and the ring current formation during storm times [J]. *Adv. Space Res.*, 2002, 30(7):1817~1820.
- [30] Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, Kubyshkina M V. Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms [J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22(4): 1317~1334.
- [31] Kalegaev V V, Ganushkina N Y, Pulkkinen T I. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(2): 523~533.