

魏 勇,洪明华,万卫星等. 行星际-赤道电场穿透效率的数值模拟研究. 地球物理学报, 2008, 51(5):1279~1284

Wei Y, Hong M H, Wan W X, et al. A modeling study of interplanetary—equatorial electric field penetration efficiency. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5):1279~1284

行星际-赤道电场穿透效率的数值模拟研究

魏 勇^{1,2,3}, 洪明华¹, 万卫星¹, 杜爱民¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所,北京空间环境国家野外科学观测研究站,北京 100029

2 中国科学院武汉分院物理与数学研究所,武汉 430071

3 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 电场穿透作为强烈地磁活动期间太阳风-磁层-电离层电动力学耦合的重要形式,近年来一直是空间物理学最为活跃的课题之一. 在过去的近 40 年里人们一直关注于观测证据的寻找以及物理过程的模拟,“电场穿透效率”这一重要量化指标直到最近几年才得到重视. 本文定义赤道电场增量与对应的行星际电场增量的比值为穿透效率,通过数值模拟的方法对穿透效率的地方时变化以及与中性风发电机的关系做了实验性讨论,在一定简化条件下结果表明:(1)不考虑跨极盖电势饱和的情况下,赤道电场增量与行星际电场增量呈线性关系,且中性风发电机并不影响电场穿透效率;(2)恒定重联线长度 L 的限定下,穿透效率具有明显地方时依赖性. 例如对于 $L=2.6 R_E$,在 9LT 至 23LT 之间,穿透效率维持在 10%左右;0LT 至 7LT 之间,穿透效率迅速从 2%上升至 30%后又迅速回落到原始水平,形成尖峰. 这些结果基本符合观测特征.

关键词 太阳风-磁层-电离层耦合,行星际电场,电场穿透

文章编号 0001-5733(2008)05-1279-06

中图分类号 P353

收稿日期 2008-02-25,2008-06-23 收修定稿

A modeling study of interplanetary-equatorial electric field penetration efficiency

WEI Yong^{1,2,3}, HONG Ming-Hua¹, WAN Wei-Xing¹, DU Ai-Min¹

1 *Beijing Observatory for Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*

3 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract As an important way of solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling during strong geomagnetic activity period, electric field penetration has been an active topic in space physics for many years. In the past four decades, many researchers were interested in the observational evidence and theoretic modeling to search for the physical mechanism, however, the “electric field penetration efficiency”, which is supposed to be an important quantitative index, has received less attention. Defining the penetration efficiency as the ratio of equatorial electric field increment to the corresponding interplanetary electric field increment, this paper aims to discuss the local time dependence of electric field penetration efficiency and its relation to neutral wind. Our result of numerical modeling suggests that: (1) Without considering transpolar potential saturation, equatorial electric field increment linearly responds to IEF increment, and neutral wind does not affect the penetration efficiency; (2) Assuming constant magnetic reconnection length $L=2.6 R_E$,

基金项目 中国科学院知识创新工程重要项目(KZCX3-SW-144),国家自然科学基金项目(40674080,40374061)和国家自然科学基金重大项目(40390152)资助.

作者简介 魏 勇,男,2008年毕业于中科院研究生院,获空间物理学博士学位.现从事磁层-电离层耦合、磁层亚暴与磁场重联的相关研究.
E-mail: weiy@mail.igcas.ac.cn

the local time dependence of penetration efficiency can be described as follows: it is about 10% between 9 and 23LT, however, increases rapidly from 2% up to 30% and decreases quickly to 2% between 0 and 7LT. All above characteristics are basically consistent with observations.

Keywords Solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling, Interplanetary electric field, Electric field penetration

1 引言

电动力学耦合是磁暴期间太阳风-磁层-电离层能量耦合的一种重要形式. 早在 1966 年, Nishida 等^[1]就发现了向日面赤道区电离层电场扰动与行星际电场变化的明显相关性. 这一现象被称为“电场穿透(Electric Field Penetration)”, 最新的观测证据表明^[2], 这一过程甚至能持续几天. 1973 年, Jaggi 与 Wolf^[3]对电场穿透现象进行了模拟研究, 指出场向电流系统在磁暴期间的变化导致了电离层中的高纬电场向中低纬地区的泄露现象, 这一过程等价于磁层晨昏对流电场向内磁层的入侵. 1976 年, Iijima 与 Potemra^[4]的统计结果表明了高纬地区有 1 区和 2 区两种不同场向电流体系的存在. 随后, Nopper 与 Carovillano 使用二维高度积分电离层参数建立了一个模型, 从电动力学的角度研究了两个区域场向电流的分布对赤道电离层电场的影响, 确认了 2 区场向电流对 1 区场向电流所对应的晨昏对流电场的屏蔽作用^[5].

磁暴开始后的短时间内, 随着行星际磁场南向翻转, 1 区场向电流突然增大, 而与部分环电流闭合的 2 区场向电流则受环电流区粒子注入的控制, 缓慢增加, 这一时间上的延迟导致了 2 区场向电流对 1 区场向电流的屏蔽不足, 随着 1 区场向电流的向中低纬的入侵, 高纬电场也穿透到中低纬, 直至赤道地区. 尽管穿透电场研究已经进行了几十年, 但是由于穿透电场与背景电场以及其他扰动效应在观测上难以分离, 使得定量评价电场穿透的工作较为稀少.

基于不同的物理图像和研究目的, 研究者们使用不同的定义来评价电场穿透的效率. 目前常见的在 GSM 坐标系中计算的电场穿透效率有三种: (1) 赤道电场与行星际电场的 Y 分量之比. Kelley 等^[6]分析 2002 年 4 月 17 日磁暴期间的 ACE 观测到的行星际电场和 Jicamaca 雷达观测到的赤道电离层电场后发现两者之间具有非常好的相关性, 并且给出了穿透效率约为 6.6% (即 1:15). (2) 赤道电场 Y 分量与重联电场之比. Wei 等^[2]分析了一个持续长

达 125 h 的多重电场穿透事件, 得到平均的穿透效率为 13.6%. (3) 赤道电场与行星际电场对应的 Y 分量增量之比. 也即行星际电场 Y 分量的突然增加量和与之伴随的赤道电场 Y 分量增加量之比. Huang 等^[7]统计了 73 个 Jicamaca 非相干散射雷达位于向日侧(10~15 LT)时所观测到的该类事件, 得到穿透效率约为 9.6%. 本文采用第三种定义方式. 由于观测手段的限制, 目前这些结果都是忽略穿透效率的地方时依赖性的, 因此较难帮助我们理解全球性的穿透效率分布. 而且, 究竟哪些因素影响穿透效率, 其相对重要性如何评价, 也是有待解决的问题.

从太阳风到电离层的电动力学耦合过程非常复杂, 磁活动期间内磁层与电离层的耦合包含了许多物理和化学过程. RCM、CTIPe、TIEGCM 等模型在过去的几十年内对这一耦合链的下游过程的研究都取得了出色的成果, 但是这些复杂模型的自治要求影响了其在单独评估各输入参数影响上的灵活性. 本文关注 1 区场向电流明显大于 2 区场向电流时行星际电场向赤道的穿过程, 包括中性风发电机对穿透效率的影响以及穿透效率的地方时变化, 因此忽略了 2 区场向电流的屏蔽, 试图通过一个非自治的模型来对上述穿透效率的相关问题做一些讨论. 我们在 Euler Potential 坐标系下建立起一个二维高度积分电离层电动力学模型, 通过改变高纬电势、电导率、中性风等输入参数来分析穿透效率的地方时变化及其与中性风的关系.

2 模型描述

我们对美国 Prairie View A&M 大学的风场发电机模型 PVDM (Prairie View Dynamo Model)^[8]进行改进, 考虑高纬穿透电场, 调整各输入参数, 使之适合穿透效率的研究. 模型可简单描述如下:

2.1 考虑南北半球耦合的中性风发电机方程

电离层对电磁场的响应可以表示为广义欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_p (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})_{\perp} + \sigma_H \mathbf{b} \times (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

其中 \mathbf{J} 为总电流密度, σ_0 , σ_p 和 σ_H 分别表示平行电

导率、Pederson 电导率和 Hall 电导率, \mathbf{E} 为静电场, \mathbf{B} 表示背景磁场, 其方向矢量为 \mathbf{b} , \mathbf{u} 是中性风速度. 下标“//”与“ \perp ”分别表示平行和垂直于磁场的方向上的分量.

我们用距地面 110 km 高度的二维的“薄壳”来作为近似电离层. 把电导率沿高度积分到“薄壳”上去, 而中性风则沿用二维 E 层发电机常用的等效方法, 即使用(1,-2)潮汐模. 然后水平积分电流 \mathbf{J}_H 可表示为

$$\mathbf{J}_H = \Sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_w, \quad (2)$$

这里 $\Sigma = \begin{pmatrix} \frac{\Sigma_P}{\cos^2 \chi} & -\frac{\Sigma_H}{\cos \chi} \\ \frac{\Sigma_H}{\cos \chi} & \Sigma_P \end{pmatrix}$ 是积分的电导率张量,

\mathbf{J}_w 是中性风感生电流.

考虑沿磁力线流入流出电离层的场向电流, 在赤道以外的闭合磁力线区域, 根据电流无散条件可以得到:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_H = -j_{//} \cos \chi. \quad (3)$$

该式中 $j_{//}$ 表示沿磁力线的场向电流, χ 是磁场方向与薄壳法线方向的夹角. 负号表示电流流入电离层. 对于静电场有 $\mathbf{E} = -\nabla \Phi$, (3)式变为

$$\nabla \cdot [\Sigma(-\nabla \Phi) + \mathbf{J}_w] = -j_{//} \cos \chi. \quad (4)$$

在闭合磁力线区域, 假设平行电导率无限大, 磁力线可看作等势线, 南北半球磁共轭点的电势相等, 在 Euler Potential 坐标系中表示为

$$\Phi_N(\alpha, \beta) = \Phi_S(\alpha, \beta), \quad (5)$$

下标 S 和 N 分别表示南北半球. (α, β) 为 Euler Potential 坐标, 满足 $\mathbf{B} = \nabla \alpha \times \nabla \beta$, 该坐标系的特点是 (α, β) 沿同一根磁力线保持恒定^[8], 在偶极场中 Euler Potential 坐标与球坐标的关系为: $\alpha = -\frac{B_0 R_E^3 \sin^2 \theta}{r}$, $\beta = \varphi$, 这里 B_0 (30200nT) 为地球表面磁赤道处的磁场幅度, R_E 为地球半径, φ 为磁经度.

根据以上假设, 薄壳以外没有电流穿越磁力线, 所有的电流都沿着磁力线管在两个半球之间流动:

$$\left(\frac{j_{//}}{B}\right)_S = \left(\frac{j_{//}}{B}\right)_N. \quad (6)$$

由(4)和(6)式得到:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\nabla \cdot [\Sigma(-\nabla \Phi) + \mathbf{J}_w]}{B \cos \chi}\right)_N \\ &= \left(\frac{\nabla \cdot [\Sigma(-\nabla \Phi) + \mathbf{J}_w]}{B \cos \chi}\right)_S. \end{aligned} \quad (7)$$

把(7)式的各参量都表示在 Euler Potential 坐标系

中, 可以得到:

$$P_1 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} + P_2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} + P_3 \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} + P_4 \frac{\partial \Phi}{\partial \beta} + P_5 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} = P_6, \quad (8)$$

其中 $P_i = P_{iN} - P_{iS}$, $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ (见附录).

椭圆方程(8)包含的未知数为静电势, 因为静电势共轭等势, 且方程(8)的系数中已经包含南北半球参数, 故此方程只需在一个半球上求解. 为求解方程(8), 我们将全球划分为 201×60 的网格来输入参数, 然后在北半球的 101×60 的网格中求解.

2.2 输入参数及边界条件

本文侧重于评价穿透效率的地方时变化, 以及考察中性风发电机是否对穿透效率产生影响, 因此尽量简化问题. 为避免引入其他因素的影响, 输入参数的选取尽量保持南北半球的对称. 基于这个考虑, 我们选取地心共轴偶极场作为地磁场, (1,-2)模潮汐风为中性风, 电导率采用文献[5]的积分电导率且假设电场穿透期间中性风与电导率均保持不变. 中性风与电导率都对对应春秋分时的情况来保持南北半球的对称性. 这样选取对称参数并不会导致方程(8)的系数为 0, 因为中性风纬向分量以及磁场方向与薄壳法线方向的夹角 χ 在共轭点是大小相等且方向相反的, 结果使得场向电流为 0, 消去了南北半球电流耦合所带来的影响.

赤道边界条件: 在赤道地区考虑 $j_r = 0$, 产生 Cowling 电导率效应, 所导出的赤道边界条件为

$$L \frac{\partial \Phi(\alpha_{\text{equator}}, \beta)}{\partial \alpha} + M \frac{\partial \Phi(\alpha_{\text{equator}}, \beta)}{\partial \beta} = N, \quad (9)$$

其中 L, M, N 三个系数的具体形式见附录.

高纬边界条件: 假设电场穿透期间 1 区场向电流位置保持不变, 我们选取地心共轴偶极场的 72° 纬度圈作为高纬边界(开闭磁力线边界). 1 区场向电流在高纬边界的效果由跨极盖电势表达, 则高纬边界条件可按文献[9]写成: $\Phi_P = A \sin \varphi$ (kV), 其中 A 为跨极盖电势降的一半, φ 为磁经度, 本文中地理经纬度与地磁经纬度重合的.

行星际电场: 在不考虑跨极盖电势饱和的情况下, 设定由公式 $2A = \Phi_0 + LE_y$ ^[10] 给出行星际电场晨昏分量 E_y , 其中 Φ_0 是跨极盖电势降中与行星际电场无关的部分. 系数 L 表示向阳面磁层定重联区域的尺度, 反映行星际电场通过磁场重联进入磁层的能力, 主要由行星际磁场以及地球磁层位形决定, 一般为 2~5 个地球半径(R_E).

3 结果分析

3.1 赤道电场对行星际电场的线性响应及中性风对穿透效率的影响

为考察赤道电场对行星际电场的响应,我们保持电导率不变,分别调整中性风输入和高纬边界晨昏电势降半幅值 A . 中性风的影响分有风场和无风场两种情况来分析, A 分别设定为 10、15、20、25 kV 和 30 kV. 根据 L 的变化范围,考虑首先设置 L 为 $2.6 R_E$,以便与文献[7]的统计结果(12LT 处穿透效率为 9.9%)相比较. L 对穿透效率的影响将在后面讨论.

为与观测统计结果^[7]做比较,我们侧重于分析日侧的情况,因此选取 12 LT 为例来分析,结果如图 1 所示. 横轴表示行星际电场增量,纵轴表示赤道电场增量. 圆圈表示有中性风输入,星号对应无中性风的情况. 圆圈与星号完全重合说明中性风对穿透效率并无影响,各点呈线性分布,确认了观测中赤道电离层电场对行星际电场的线性响应特征^[7]. 行星际电场穿透效率(即斜率)在 12 LT 处为 9.9%,与文献[7]统计观测数据的结论一致.

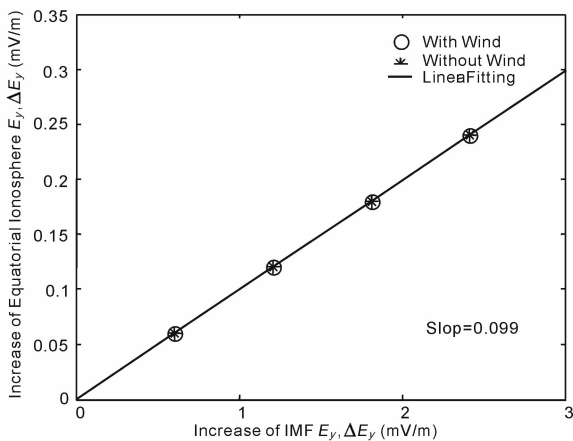


图 1 行星际电场增量与赤道电场增量的在 12LT 处的线性关系,斜率即为穿透效率

圆圈表示输入中性风的情况,星号则表示无中性风的情况.

Fig. 1 Correlation between increase of equatorial ionosphere E_y and increase of IEF E_y , the slope is penetration efficiency

Circles indicate the calculation with neutral wind, stars represent the calculation without neutral wind.

中性风场不影响电场穿透效率,可由模型所假定的物理过程来解释. 因为我们所考察的电场穿透过程具有瞬时性,从电场穿透的时间尺度上考虑,忽

略中性风的变化及其对行星际-磁层扰动的反馈机制是合理的. 于是模型中所求解的方程可以写做一个非齐次边界条件(指高纬边界电势分布,随行星际电场线性变化)的带强迫振动项(中性风发电机)的泊松方程组,该类型的方程组可以被看作是一个齐次边界条件带强迫振动项的泊松方程组和一个非齐次边界条件无强迫振动项的泊松方程组的线性叠加. 换句话说,中性风所产生的电场扰动与高纬穿透下来的电场在赤道地区是可以线性叠加的,所以中性风发电机可以改变赤道电场的幅度,却不改变赤道电场对高纬电场的线性响应. 容易理解,在含有非其次边界条件的子方程组中,赤道电场对高纬边界电场也是线性响应的. 需要说明的是,随着行星际电场的增强,极盖电势达到饱和的时候,这一线性关系将被改变.

另外值得提到的是,我们的模型主要表达电离层 E 层,忽略了 F 层发电机效应,使得夜侧情况的可信度降低. 但是我们证明中性风对穿透效率无影响,故在我们关注的问题上,夜侧的可信度接近日侧.

3.2 电场穿透效率的地方时变化

沿用上小节描述的方法与参数设定,我们计算出赤道各点对应的穿透效率,空间分辨率为 6 个纬度. 重联线长度 L 对穿透效率具有影响,它由行星际磁场的南北分量决定,南向分量越强, L 就越大,太阳风-磁层耦合效果越显著,穿透效率就越大. 本文通过 3 个典型值 2.4 、 2.6 和 $2.8 R_E$ 来考察其影响. 如图 2 所示,当 L 为 $2.6 R_E$ 时,穿透效率的地方

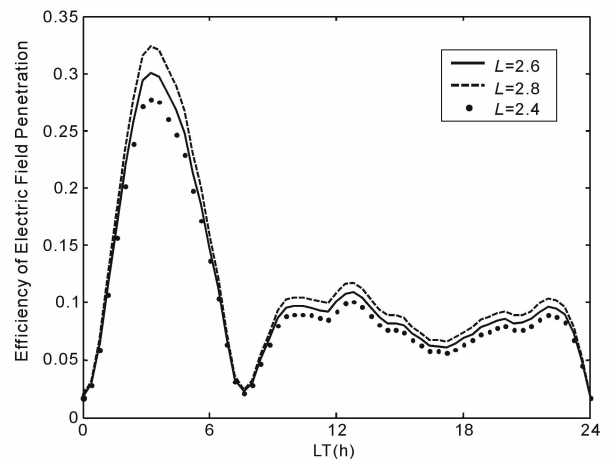


图 2 电场穿透效率随地方时的变化

横轴为地方时,纵轴为穿透效率. 虚线、实线和点线分别给出了 L 等于 2.8、2.6 和 $2.4(R_E)$ 时的穿透效率.

Fig. 2 Local time dependence of penetration efficiency The dashed line, solid line and dotted line respectively correspond to three cases while L equals 2.8, 2.6 and $2.4(R_E)$.

时变化具有两个较为明显的特点:(1)在 9 LT 至 23 LT 之间,穿透效率维持在 10% 左右.(2)0 LT 至 7 LT 之间,穿透效率迅速从 2% 上升至 30% 后又迅速回落到原始水平,形成尖峰. L 的增大($2.8 R_E$)和减小($2.6 R_E$)对子夜(0 LT)以及晨侧(7~8 LT)附近的穿透效率影响较小.

文献[7]统计了 73 个日侧(10~15 LT)电场穿透的事件,发现这些事件具有类似的穿透效率 9.6%. 根据我们的结果——日侧电离层穿透效率波动不大,可以推测行星际-磁层电场穿透的效率也应保持较为稳定的值. 在行星际磁场长时间持续南向期间,向阳面磁层顶重联活动增强,晨昏对流电场增强,跨极盖电势随之增强,2 区场向电流如果长时间内发展缓慢,使得长时间稳定的电场穿透成为可能,我们模型的物理假设考虑了这种情况.

4 结论与讨论

本文利用数值模拟方法针对行星际-赤道电场穿透效率做了实验性探讨. 在一定的简化条件下,得到基本结论为:(1)不考虑跨极盖电势的饱和效应,赤道电场对行星际电场线性响应,且中性风发电机不影响电场穿透效率;(2)穿透效率具有地方时变化:在 9 LT 至 23 LT 之间,穿透效率维持在 10% 左右,0 LT 至 7 LT 之间,穿透效率从 2% 迅速上升至 30% 后又迅速回落到原始水平,形成尖峰. 该结论基本与观测相符合.

由于观测手段的限制,目前关于行星际-赤道电场穿透效率的研究仅限于太阳风卫星观测数据和赤道 Jicamarca 非相干雷达观测数据的对比,使得我们对于电场穿透这一全球现象的理解必须借助于模拟手段,而评价各种参数对穿透效率的影响又要求使用较为灵活的模型,我们的工作为尝试解决这些问题而开展,尚有许多问题可以借助这一方式讨论. 比如,本文假设电导率不变,与中性风一样,是考虑到该参数在电场瞬间穿过程中保持不变. 而电离层电导率主要受控于太阳辐射导致的化学过程,在磁暴初始阶段,电导率与平静时期差别不大,而当中性风扰动发电机效应显著的时候,电导率将发生明显变化,所以本文的方法适用于讨论磁暴初期的情况,电导率对穿透效率的影响将在后续工作中研究.

另外,南北半球不对称性已经被广泛研究,中性风、电导率以及地磁场南北不对称性将诱发南北半球之间的场向电流耦合^[8],磁暴期间电离层电场与

电流均呈现不对称性^[11],这也是可能影响电场穿透效率的重要因素之一. 我们的模型所使用的 Euler Potential 坐标系以及对南北半球电流耦合的描述更适合于理解太阳风-磁层-电离层电动力学耦合过程^[12]. 南北半球不对称性对于电场穿透的效率的影响以及相关问题的定量化研究也将是我们下一步工作的重点.

附 录

公式(8)中椭圆方程的系数^[8]分别为

$$P_{1j=N,S} = \frac{1}{B\cos\chi} \left(- (A+C) \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} - \frac{G+I}{\sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S},$$

$$P_{2j=N,S} = \frac{1}{B\cos\chi} \left(- (F+D) \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} - \frac{H+K}{\sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S},$$

$$P_{3j=N,S} = \frac{1}{B\cos\chi} \left(- \frac{\partial(A+C)}{\partial\theta} - \frac{\cos\theta}{\sin\theta} (A+C) - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial(G+I)}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S},$$

$$P_{4j=N,S} = \frac{1}{B\cos\chi} \left(- \frac{\partial(F+D)}{\partial\theta} - \frac{\cos\theta}{\sin\theta} (F+D) - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial(H+K)}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S},$$

$$P_{5j=N,S} = \frac{1}{B\cos\chi} \left(- (A+C) \frac{\partial\beta}{\partial\theta} - \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} (F+D) - \frac{H+K}{\sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi} - \frac{G+I}{\sin\theta} \frac{\partial\beta}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S},$$

$$P_{6j=N,S} = \frac{-1}{B\cos\chi} \left(\frac{\partial J_{w\theta}}{\partial\theta} + \frac{J_{w\theta}}{\tan\theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial J_{w\varphi}}{\partial\varphi} \right)_{j=N,S}.$$

其中

$$J_{w\theta} = B \left(\frac{\cos^2\xi}{\cos^2\chi} + \sin^2\xi \right) \cos\chi \Sigma_P u_\varphi - B \left(\sin\xi \cos\xi \left(\frac{1}{\cos\chi} - \cos\chi \right) \Sigma_P - \Sigma_H \right) u_\theta,$$

$$J_{w\varphi} = -B \left(\frac{\sin^2\xi}{\cos^2\chi} + \cos^2\xi \right) \cos\chi \Sigma_P u_\theta + B \left(\sin\xi \cos\xi \left(\frac{1}{\cos\chi} - \cos\chi \right) \Sigma_P + \Sigma_H \right) u_\varphi,$$

$$A = \left(\frac{\cos^2\xi}{\cos^2\chi} + \sin^2\xi \right) \frac{\Sigma_P}{R_E} \frac{\partial\alpha}{\partial\theta},$$

$$F = \left(\frac{\cos^2\xi}{\cos^2\chi} + \sin^2\xi \right) \frac{\Sigma_P}{R_E} \frac{\partial\beta}{\partial\theta},$$

$$C = \left(- \frac{\Sigma_H}{\cos\chi} + \frac{\sin^2\chi \sin\xi \cos\xi}{\cos^2\chi} \Sigma_P \right) \frac{1}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi},$$

$$D = \left(- \frac{\Sigma_H}{\cos\chi} + \frac{\sin^2\chi \sin\xi \cos\xi}{\cos^2\chi} \Sigma_P \right) \frac{1}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\beta}{\partial\varphi},$$

$$G = \left(\frac{\Sigma_H}{\cos\chi} + \frac{\sin^2\chi \sin\xi \cos\xi}{\cos^2\chi} \Sigma_P \right) \frac{1}{R_E} \frac{\partial\alpha}{\partial\theta},$$

$$H = \left(\frac{\Sigma_H}{\cos\chi} + \frac{\sin^2\chi \sin\xi \cos\xi \Sigma_P}{\cos^2\chi} \right) \frac{1}{R_E} \frac{\partial\beta}{\partial\theta},$$

$$I = \left(\frac{\sin^2\xi}{\cos^2\chi} + \cos^2\xi \right) \frac{\Sigma_P}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi},$$

$$K = \left(\frac{\sin^2\xi}{\cos^2\chi} + \cos^2\xi \right) \frac{\Sigma_P}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\beta}{\partial\varphi}.$$

公式(9)中各系数分别为:

$$L = -\sigma_P \frac{\partial\alpha}{\partial r} + \sigma_H \frac{B_\varphi}{|B|} \frac{1}{R_E} \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} - \sigma_H \frac{B_\theta}{|B|} \frac{1}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\alpha}{\partial\varphi},$$

$$M = -\sigma_P \frac{\partial\beta}{\partial r} + \sigma_H \frac{B_\varphi}{|B|} \frac{1}{R_E} \frac{\partial\beta}{\partial\theta} - \sigma_H \frac{B_\theta}{|B|} \frac{1}{R_E \sin\theta} \frac{\partial\beta}{\partial\varphi},$$

$$N = -\sigma_P (u_\theta B_\varphi - u_\varphi B_\theta).$$

参考文献(References)

- [1] Nishida A. Coherence of geomagnetic DP2 fluctuations with interplanetary magnetic variations. *J. Geophys. Res.*, 1968, **76**: 5549
- [2] Wei Y, Hong M, Wan W, et al. Unusually long lasting multiple penetration of interplanetary electric field to equatorial ionosphere under oscillating IMF B_z . *Geophys. Res. Lett.*, 2008, doi:10.1029/2007GL032305
- [3] Jaggi R K, Wolf R A. Self-consistent calculation of the motion of a sheet of ions in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**: 2852
- [4] Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**: 2165~2174
- [5] Nopper R W, Carovillano R L. Polar - equatorial coupling

during magnetically active Periods. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**(8): 699~702

- [6] Kelley M C, Makela J J, Chau J L, et al. Penetration of the solar wind electric field into the magnetosphere/ionosphere system. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(4): 1158~1161
- [7] Huang C S, Sazykin S, Chao J et al. Penetration electric fields: Efficiency and characteristic time scale. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2007, **69**(10): 1135~1146
- [8] Le Sager P, Huang T S. Ionospheric currents and field-aligned currents generated by dynamo action in an asymmetric Earth magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A2): 1025~1038
- [9] Vasyliunas V M. Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere. In: McCormac B M ed. *Particles and Fields in the Magnetosphere*, New York; Springer, 1972. 60~66
- [10] Burke W J, Weimer D R, Maynard N C. Geoeffective interplanetary scale sizes derived from regression analysis of polar cap potentials. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A5): 9989~9994
- [11] 沈长寿, 资民筠, 王劲松等. 关于暴时电离层电流分布的南北半球不对称性. *地球物理学报*, 2006, **49**(6): 1573~1581
- Shen C S, Zi M Y, Wang J S, et al. On the asymmetry of the storm time current system in the ionosphere between southern and northern hemispheres. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1573~1581
- [12] Wolf R A, Spiro R W, Sazykin S, et al. Use of Euler potentials for describing magnetosphere-ionosphere coupling. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A7): 315~322

(本文编辑 汪海英)