

电离层电场半年变化的模拟研究^{*}

余 涛¹ 万卫星¹ 刘立波¹ 雷久侯¹ 李小银²

¹(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

²(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要

利用一个中低纬电离层电场理论模式,模拟太阳活动低年、地磁活动平静情况下,中低纬地区电离层电场全年的变化情况.结果显示,单独计算南、北半球(去耦合)得到电离层电场具有明显的周年变化特征,且两个半球电场的相位相差半年左右.而同时计算南、北半球(计及耦合)时,电场则是以半年变化为主,且这种半年变化的幅度和相位随地方时和地磁纬度有变化.提出一个南、北半球耦合电路的简单物理模型给予解释.电路模型初步计算发现,即使两个半球电离层电场分别具有周年变化,只要它们变化的幅度相当,相位相差半年左右,由于跨越南北半球磁力线的耦合效果,耦合的电离层电场会产生明显的半年变化分量.由于缺少连续的电离层电场观测资料,将模拟结果与 Richmond 基于非相干散射雷达数据建立的经验模式(ISR Model)相比较,结果符合较好.

关键词 电离层电场; 理论模拟; 电场半年变化; 耦合电路

1 引言

电离层中许多参量都呈现出明显的周年和半年变化现象^{[1],[2]},并且在不同的地区,这些变化的幅度和相位明显不同^{[3],[4]}.一般认为,在南北半球的中高纬度地区,由于存在分明的四季,背景大气和电离层都是以周年变化为主,这种现象在靠近地磁磁极点的近极地区尤其显著.但是在远极地区, F_2 区的峰值电子浓度(N_mF_2)的半年变化仍然显著^{[5],[6]}.在四季不太分明的赤道地区,电离层和背景大气一般表现为明显的半年变化.对中性大气、电离层 N_mF_2 、TEC以及其他诸多参量的周年和半年变化的研究工作已经广泛开展并取得较一致的结论^[7].中性成分中许多有趣的周年和半年变化现象被更多作者发现并报道,利用非相干散射雷达,Paetzold等^[8]发现了高层大气密度的年变化和半年变化;Cox和Evans^[9]观测到 F_1 层原子-分子浓度比值 $[O/N_2]$ 的季节变化;Waldteufel^[10]利用非相干散射雷达数据研究了热层中性成分密度和温度的季节变化;Reddi^[11]分析火箭探测和流星雷达的数据,发现了中性风的周年和半年变化规律.最近Lal^[12]报道了太阳风及其引起的地磁活动的半年变化.马瑞平^{[13],[14]}分析了临界频率和赤道电急流的半年变化并指出了可能的物理因素.

在中低纬和赤道电离层中,电离层电场对等离子体的结构和形态具有重要影响.但是,由于电离层电场观测手段的局限,以及长时间连续观测的困难,对电离层电场的研究

^{*} 国家重点基础研究项目(G2000078407),国家自然科学基金项目(40134020,49974039)共同资助

2003-01-28 收到原稿, 2004-01-04 收到修定稿

一般集中在其周日变化及其随太阳活动的研究上面, 关于电离层电场的周年和半年变化的研究工作鲜有报道. 利用 Jicamarca 的非相干散射雷达的观测数据, Fejer 等^{[15]–[17]}在赤道电离层电场形态学方面作了大量的工作, 他们的研究极大地丰富了我们对于中低纬和赤道地区电离层电场的认识. Richmond 等^[18]利用 20 世纪 70 年代中期, 欧洲、美洲 4 个非相干散射雷达 (Arecibo, St. Santin, Millston Hill 和 Jicamarca) 观测的电场数据, 建立了一个电场经验模式. 该模式可以给出太阳活动低年, 中低纬地区电离层电场的周日、季节、纬度和经度变化规律, 并被很多电离层理论模式作为电场的输入参量而得到较广泛的应用.

在缺乏实际观测数据的情况下, 很难准确地说出电离层电场是否像电离层以及背景大气中其他参量一样, 也具有明显的周年和半年变化、并且这种变化也具有明显的地区分布特征. 或由于电离层电场本身的特殊性, 使其在周年和半年时间尺度上的变化特征与其他电离层参量有明显的不同. 本文利用一个合理的电离层电场理论模式, 通过计算讨论了电场周年和半年变化的规律和特点, 并在理论上分析形成半年变化的原因, 这对我们进一步理解和认识电离层电场, 指导以后的观测实验具有实际意义.

2 模拟电离层电场

本文的模拟工作主要利用了余涛等^[19]建立的一个中低纬电离层电场理论模式, 但在求解方法上有较大的改进, 使得该模式计算收敛的速度和稳定性有很大的提高. 该模式从电离层发电机理论的基本方程出发

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla U, \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_p (\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{W} \times \mathbf{B}) + \sigma_H \mathbf{b} \times (\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{W} \times \mathbf{B}). \quad (3)$$

其中 $\mathbf{W}$, $\mathbf{J}$, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为中性风、电流、电场和磁场, U 为与电场对应的电势. $\sigma_{\parallel}$, σ_p , σ_H 分别是平行电导率, Pedersen 电导率和 Hall 电导率. $\mathbf{b}$ 为磁场的单位矢量, $\mathbf{E}_{\parallel}$, $\mathbf{E}_{\perp}$ 分别是电场平行于磁场和垂直于磁场的分量.

采用地磁偶极坐标系^[20], 推导出电离层电势满足的微分方程作为电场理论模式的出发方程. 模式的主要输入参量为电离层背景中性风 (由经验模式 HWM93^[21] 给出) 和电导率 (由经验模式 IRI90^[22], MSISE90^[23] 分别给出电子和离子的浓度、温度以及中性大气的浓度、温度). 改进后的模式采用逐线法求解电势的偏微分方程得出电势, 进而获得中低纬电离层电场及电流随时间、高度和地磁纬度的分布. 在本文考虑的地磁平静的状态下, 极区的粒子沉降等因素对中低纬电离层电场的影响很小, 该模式计算的电场可以很好地再现中低纬地区电离层电势、电场和赤道电急流的基本结构和形态.

通常情况下, 中低纬度电离层的磁力线从一个半球出发, 跨越地磁赤道到达另一个半球的电离层中. 因此, 积分一般是从南半球沿磁力线积分到北半球. 这样, 南、北半球电离层由具有良好导电性能的磁力线耦合在一起. 因此各个半球电离层电场就具有显著的非局地性, 即某一地区的电场不仅仅和当地电离层的情况相关, 而且沿磁力线路径上的所有

地区对其都有贡献,这是真实电离层中电动力学过程的图像.我们认为正是由于磁力线的耦合作用,使得电离层电场的周年和半年变化特征可能有别于电离层其它物理量.可以这样简单地理解磁力线耦合对电场半年变化的影响:对于横跨赤道的某一根磁力线而言,其一端在南半球而另外一端在北半球,这样,(1)当南半球是春季时北半球就是秋季,磁力线上的电场就是春季和秋季的综合效果;(2)当南半球是夏季时北半球就是冬季,磁力线上的电场就是夏季和冬季的综合效果;(3)当南半球到了秋季时北半球是春季,磁力线上的电场仍然是秋季和春季的综合效果,这与(1)的情况一样;(4)当南半球到了冬季时北半球是夏季,磁力线上的电场是冬季和夏季的综合效果,这又与(2)的情况一样.这样,虽然南北半球本身都因为有春夏秋冬的四个季节而表现出明显的周年变化,但是对于在某一根耦合磁力线上的电场而言却只“感受”到“春秋”和“夏冬”两个季节,因此,电场的半年变化特征应该非常明显.另外,在电场模式的计算中,需要沿磁力线积分.为了重点研究磁力线耦合对电离层电场的影响,我们分以下两种情况计算.(1)去耦合计算:单独计算南、北半球各自的电场(沿磁力线积分只包括各自的半球).(2)耦合计算:同时计算南北半球得到一个总的电场(沿磁力线积分包括南、北两个半球).在下面的计算中,太阳活动参数取低年的值(为了方便和Richmond的经验模式电场作比较),地磁活动参数取地磁宁静的情况.由外部经验模式IRI90,MSIS90,HWM93给出电离层及中性成分等输入参量.

2.1 电场的周日变化

首先讨论去耦合与耦合两种情况下电离层电场的周日变化特点.在中低纬、尤其是地磁赤道地区,东西向电场(对应垂直漂移)较垂直向电场对电离层等离子体的作用(对应纬向漂移)显著得多.因此,在下面的计算中我们重点讨论东西向电场的情况,如无特殊说明计算高度都取为300 km,大约在 F_2 层峰高附近.图1是去耦合计算时南、北半球电离层各自的电场,以及耦合计算电离层总的电场.计算的天数取为北半球春分日.结果显示,除日出后的上午和日落增强峰的时间段外,去耦合计算时南、北半球各自的电场差别明显,并与耦合计算的结果有较大不同.在正午稍前的时候,模拟的北半球电离层电场(带圆圈的实线)明显大于南半球的电场(带星号的实线),而在午夜前后刚好相反,北半球电场大而南半球电场小.我们认为这个结果可能是由于南、北半球电离层等离子体以及背景参量的不对称所致.由于电子浓度和中性风是我们电场理论模式的重要输入参量,而这些量在南北半球会有明显的不同,这样就会使得模式计算的电场在南北半球出现差异.值得注意的是:耦合计算的电离层电场的大小(粗实线)始终处于去耦合计算南、北半球各自电场之间,接近于南北半球电场的平均结果,从这个现象可以看出磁力线的耦合作用使得南北半球电场产生近似叠加效果.另外,由于在分点日南北半球具有较好的对称性,所以去耦合计算南、北半球电场的差异不太大.而至点日的情况应该不同.图2是北半球冬至日的情况.结果显示:在至点日南、北半球电离层电场差别非常明显,这是由于此时南北半球没有很好的对称性,外部模式输入的电离层等离子体、中性成分以及背景风存在着巨大差异所致.与图1类似,南、北半球的电场在日出后的上午时段差异较小,其它时段差异明显.但是在图1中差异不大的电场日落增强时段,南北半球计算的差别也非常明显.总体来说,耦合计算电场的大小始终处于南、北半球去耦合计算的电场之间,这与在分点时的结果较一致,也说明了沿磁力线的耦合使得电离层电场产生了叠加效果.

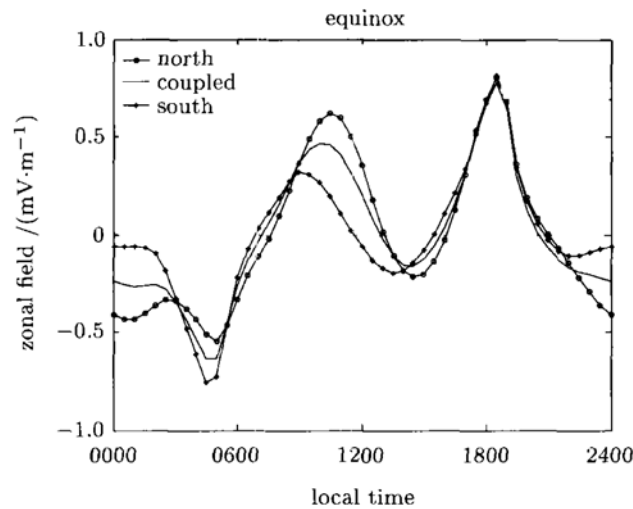


图 1 北半球春分日模拟的电离层电场 (赤道上空约 300 km 高度) 随地方时的分布
Fig.1 The simulated ionospheric electric fields (at the 300 km altitude above the equatorial ionosphere) at the March Equinox

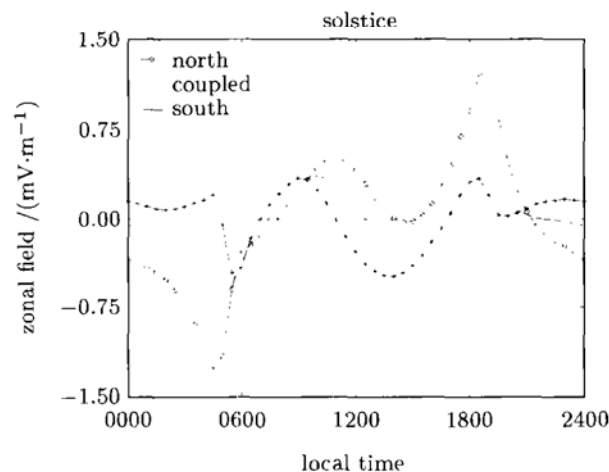


图 2 北半球冬至日模拟的电离层电场 (赤道上空约 300 km 高度) 随地方时的分布
Fig.2 The simulated ionospheric electric fields (at the 300 km altitude above the equatorial ionosphere) at the December Equinox

2.2 电场周年和半年变化

在考察电离层电场的年变化时, 我们也采用去耦合和计及耦合两种情况进行了计算. 具体的方法如下: 模式计算的天数分别选取一年的第 1 天, 第 11 天, ..., 第 361 天, 每隔十天计算一次. 由于太阳活动没有明显的周年和半年变化规律, 并且地磁活动指数 A_p 和 Dst 的半年变化并非年年都可以看到, 一般只有多年叠加才明显, 而电离层 $N_m F_2$ 半年变化几乎每年都存在^[13]. 所以, 为了剔除太阳活动和地磁活动的影响, 我们将太阳活动参数固定取为太阳低年的值, 地磁活动参数固定取为地磁宁静的值. 由于天数的变化, 外部经验模式 IRI90, MSIS90, HWM93 给出的电离层及中性成分参量都具有一年的变化

特征. 因此, 我们通过改变天数来模拟电离层电场在一年内的变化具有一定的合理性.

图 3 为午夜 (0200 LT) 和午后 (1400 LT) 时刻, 去耦合计算南、北半球各自的电场, 和耦合计算电场. 从图 3 可以看出, 在午夜 (图 3 上部), 北半球电离层电场 (带圈圈的实线) 是一个典型的周年变化, 最大值在第 180 天左右, 即北半球的夏季. 南半球电离层电场 (带星号的实线) 是稍弱的周年变化, 最小值在第 180 天左右, 即南半球的冬季. 因此, 南、北半球电场都没有出现冬季异常现象, 这与电离层 $N_m F_2$ 在夜晚没有冬季异常是一致的. 耦合计算的电场的大小基本上处于南、北半球单独计算的电场中间. 在北半球的冬至日附近, 耦合计算和去耦合计算电场的差别较大, 而在春秋分日差别较小, 这与图 1、图 2 结果一致. 值得注意的是, 去耦合计算时, 南、北半球都是周年变化的电离层电场, 在耦合计算时, 明显出现了半年变化的特征, 即在春、秋分日电场出现最小值, 而冬、夏至日电场出现最大值. 午后时这个现象更为显著 (图 3 下部), 在午后, 去耦合计算北半球电场仍然是明显的周年变化, 但最大值出现在第 360 天左右, 即北半球的冬季; 南半球电场也是明显的周年变化, 最大值出现在第 180 天左右, 即南半球的冬季. 因此, 去耦合计算时, 南、北半球电场都出现了冬季异常, 这也与白天的电离层 $N_m F_2$ 、TEC 的冬季异常一致. 同样, 耦合计算的电场一般也处在去耦合计算的电场之间, 且表现为明显的半年变化特征, 其最大值出现在春、秋分日. 显然, 在以上的计算中, 只改变了沿磁力线耦合的情况, 而得到的电场明显由周年变化为主变为半年变化为主, 因此, 可以认为模拟电场半年变化的出现与南、北半球磁力线的耦合效果直接相关.

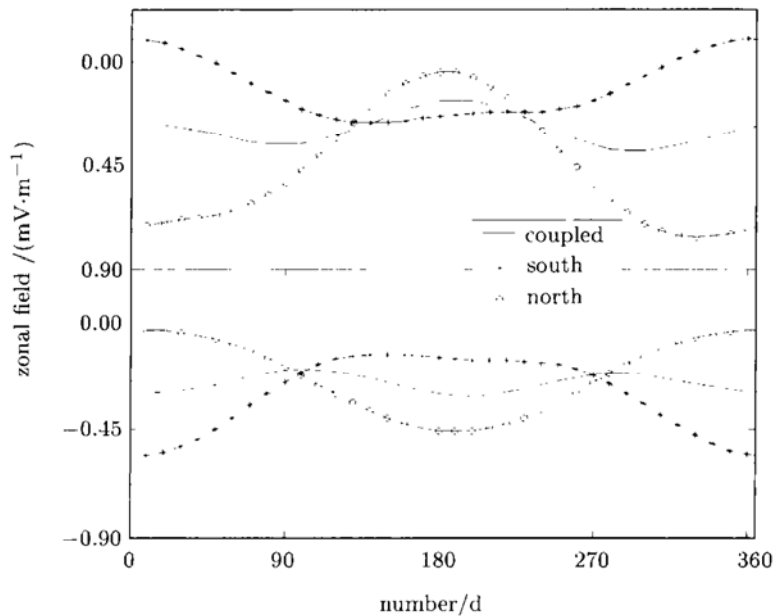


图 3 去耦合和耦合计算的电离层电场 (赤道上空约 300 km 高度) 随天数的变化
(上部为 0200 LT 的结果, 下部为 1400 LT 的结果)

Fig.3 The variations of model electric field (at the 300 km altitude above the equatorial ionosphere) as a function of day number in the coupling and uncoupling case. The upper panel show the results of midnight (0200 LT) and the bottom panel show the results of noon (1400 LT) respectively

在实际的电离层中, 沿磁力线的耦合效果是不能够忽略的, 因此, 下面的工作都是以耦合计算的电场进行讨论. 首先考察耦合电场的周年和半年变化形态随地方时的分布, 电场计算结果示于图 4, 图中等值线表示电场强度. 从图中可以看出, 几乎在所有的时间段, 耦合计算的电离层电场都具有一定的半年变化分量, 但是其半年变化的强度和相位在各个地方时不同. 在上午时段, 可以看出电场有明显的双峰分布, 尤其是地方时 1000 LT 左右, 在北半球的春分和秋分日附近电场出现了两个峰值, 即半年变化较明显. 值得注意的是, 电场半年变化的双峰出现了明显的不对称性, 其中电场在北半球春分日的值大于秋分日, 我们认为这种非对称性可能是由于电场在半年变化的基础上叠加了一个长期变化的结果, 这种非对称现象也在电离层和背景大气的观测中被发现^[23]. 从午后一直到日落前, 电场的半年变化强度稍微减小, 并且相位也有一定的改变. 在日落后的 2000 LT, 电场又出现明显的双峰分布, 且强度比上午的双峰更大, 这与电场的日落增强刚好对应. 再随后, 电场双峰分布逐渐减弱, 直到午夜和日出前又出现负的双峰分布, 即电场在分点出现最小值. 总之, 从图 4 可以得出以下两点. (1) 耦合计算的电离层电场具有明显半年变化分量, 且在不同时段半年变化的强度和相位不同. (2) 白天和夜晚电场半年变化的相位相反, 一般, 白天的电场在春秋分日出现最大值, 夜晚的电场在春秋分日出现最小值.

2.3 经验模式给出电场的周年和半年变化

早在 1970 年, 利用非相干散射雷达对电离层电场进行探测的工作就已经开展, 但是由于费用大、日常维护困难等原因, 所以到目前为止, 雷达观测电场的数据积累仍然非常有限, 因此, 我们计算的结果没有直接的观测资料作比较. 但是, 经验模式在一定程度可以反映电离层电场的季节变化特征, 可以与电场经验模式的结果对照分析. 下面我们给出 Richmond^[18] 的电场经验模式 (ISR Model) 计算的不同时段电场周年和半年变化的情况.

图 5 是电场随地方时和天数的变化情况, 其中等值线表示电场强度. 从图中可以看

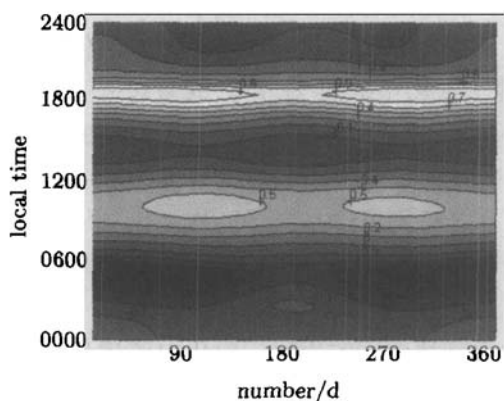


图 4 耦合计算得到的赤道上空 300 km 高度的电离层电场随地方时和天数的分布, 其中等值线表示电场的单位是 $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$

Fig.4 The contour of model electric fields at the 300 km altitudes in the equatorial ionosphere vs. the local time and day number, the unit of the electric fields is $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$

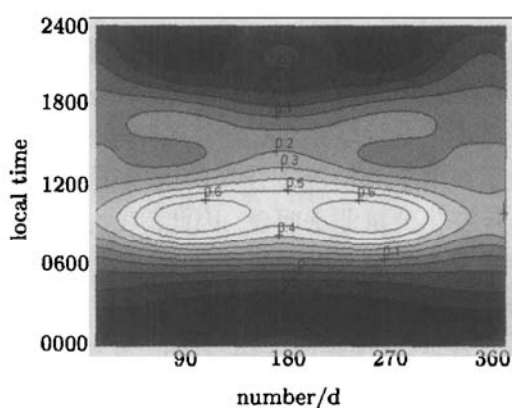


图 5 经验模式给出的赤道上空 300 km 高度的电离层电场随地方时和天数的分布, 其中等值线表示电场的单位是 $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$

Fig.5 The contour of empirical model electric fields at the 300 km altitudes in the equatorial ionosphere vs. the local time and day number, the unit of the electric fields is $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$

出, 经验模式给出的电场在大部分时间上都显示出明显的半年变化特征. 虽然对于某一个地方时, 理论模式计算的电场和经验模式给出的电场在绝对数值上可能有差异^[24], 但是两个模式给出的电场周年和半年变化的特征在大部分时段都很相似. 与图 4 相同, 在上午的 1000 LT, 电场有显著的双峰结构, 但是其峰值电场强度稍大于图 4 的结果, 且双峰具有很好的对称性. 在随后的日落前, 电场又出现了稍弱的双峰结构, 这比图 4 中日落后的双峰强度明显小, 且时间也稍早, 这可能与经验模式给出的电场日落增强现象非常弱有关系. 一直到午夜, 电场出现了明显负的双峰分布, 这也与理论模式计算的结果一致, 即电场在春、秋分日出现最小值. 在其他时间上理论模式和经验模式计算的电场半年变化特征上可能存在一定的差异, 但是, 总体来说它们的基本特征是吻合的.

3 电场半年变化的解释

电离层以及背景大气成分本身具有明显的周年和半年变化规律. 对于这些变化有许多解释, Rishbeth 和 Setty^[25] 提出, 原子-分子成分比值 $[O/N_2]$ 的变化可以影响白天电离层 $N_m F_2$ 的变化. Rothwell^[26] 认为沿磁力线南北半球等离子体的输运可能导致电离层等离子体的季节异常, 但是这个过程太慢不足以解释观测结果. Johnson^[27] 和 King^[28] 提出由夏季半球向冬季半球的大气环流输运过程可以改变 $[O/N_2]$, 进而导致 $N_m F_2$ 的变化. 这样可以很好地解释在近极地区 $N_m F_2$ 显著的冬季异常现象^[7]. 而在远极和赤道地区, $N_m F_2$ 则是以半年变化为主. 其中, 远极地区 $N_m F_2$ 的半年变化可以认为是太阳辐射引起的电子产生率的变化与 $[O/N_2]$ 变化的共同作用的结果. 而在赤道地区, 太阳天顶角的半年变化、以及盛行风在分点出现最小值可能对 $N_m F_2$ 的半年变化都有贡献^{[4],[7]}. 我们关心的是, 电离层以及背景大气的这些周年和半年变化是否是电离层电场的半年变化出现的主要原因, 或还有其他的因素起主要作用. 非常明显, 由于电离层磁力线的优良导电性能, 南、北半球被紧紧地联系在一起, 就像磁力线将电离层 E、F 区联系起来一样. 正是由于这种联系, 使得电离层电场与其他参量不同而具有显著的非局地性. 前面的工作显示在非耦合情况下计算的电场在大部分时段都有周年变化的特点, 而耦合计算电场的半年变化分量非常明显. 因此, 我们认为南北半球耦合机制可能是电场产生半年变化的一个主要原因. 下面我们引入 Kelley^[29] 提出的一个简化电路模型, 从理论上讨论耦合机制如何能够使电场产生半年变化.

首先, 分析电离层中电场、电流产生和形成的物理机制, 作为构建简化电路模型中各个元件的基础. 在电离层中, 中性风拖曳等离子体切割磁力线运动, 并且由于电子、离子的碰撞频率和磁回旋频率在不同高度上的差异, 使得在 E 区的高度上形成感生电场. 同时, 感生电场引起的电流使得电荷分离, 导致一个极化电场的产生. 在大范围电离层中, 由于电中性的要求, 极化电场和风力驱动的感生电场共同产生的电流应该满足电流无散条件 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, 这就是电离层 E 区发电机过程. 同样, 在 F 区高度上也存在一个电离层发电机, 并且与 E 区发电机通过磁力线耦合在一起. 在白天, 由于 E 区电导率比 F 区大得多, F 区发电机效果不明显. 但在夜间 F 区发电机同样对电离层的电场、电流具有重要意义. 另外, 在沿磁力线延伸到另外一个半球的电离层中, 同样存在一个 E 区发电

机和一个 F 区发电机, 每个发电机都有内阻, 并且与其他发电机互为负载. 在以下的电路中, 将发电机简化为电源和内阻, 将磁力线简化为导线.

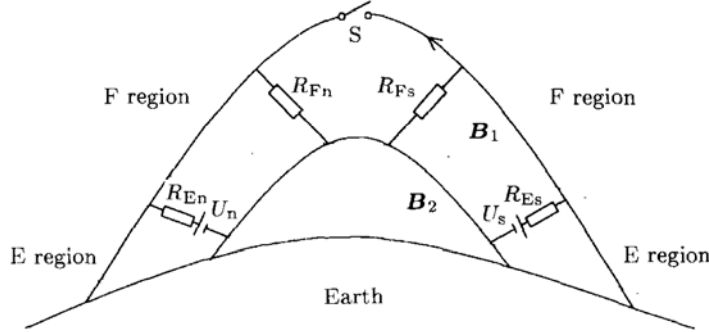


图 6 南北半球耦合电路示意图

(U 为发电机电源, R 为电阻, B_1, B_2 为磁力线, S 为耦合控制开关)

Fig.6 Electric circuit analogy to couple the two hemispheres at the mid-and low-latitudes, where U denote the dynamo, R denotes the resistance, B_1, B_2 denote the magnetic flux and S denotes the switch

简化的电路如图 6 所示. 图中我们忽略了 F 区的发电机, 但保留其电阻作为负载, 由于白天主要是 E 层发电机的贡献^[30], 这样的假设在白天是合理的. 同时我们分别考虑了耦合和去耦合两种情况. (1) 开关 S 打开时为去耦合, 此时为两个独立电路, 互相没有影响; (2) 开关 S 闭合时南、北半球就耦合在一起. 通过简单的电路分析就可以计算出这两种情况下磁力线 B_1, B_2 上的电势差 ΔU (正比于电场强度). 在第一种情况下计算的南、北半球的电势差是独立的, 结果为

$$\Delta U_n = \frac{U_n R_{Fn}}{R_{En} + R_{Fn}}, \quad \Delta U_s = \frac{U_s R_{Fs}}{R_{Es} + R_{Fs}}. \quad (4)$$

第二种情况是南北半球耦合在一起, 电势差在两个半球相同, 结果为

$$\Delta U = \frac{(U_n R_{Es} + U_s R_{En}) R_F}{R_{En} R_{Es} + (R_{En} + R_{Es}) R_F}, \quad (5)$$

其中, 等效电阻

$$R_F = \frac{R_{Fn} R_{Fs}}{R_{Fn} + R_{Fs}},$$

U_s, U_n 分别表示由 E 层发电机作用在南北半球产生的电势, R_{Fs}, R_{Fn} 分别表示南、北半球 F 区电阻, R_{Es}, R_{En} 分别表示南、北半球 E 区电阻. 为了能够利用 (4), (5) 式计算出电势差周年和半年变化特征, 必须给出以上各个量 (U, R 等) 的周年和半年变化规律. 在最简单的情况下, 作以下假定: 南、北半球的电势、电阻具有相同的周年变化, 但是相位相反 (计算中采用正弦函数表示). 由于电离层电子浓度, 背景成份的周年变化比较明显, 并且两半球季节变化刚好相反, 这个假设基本合理. 而且, 我们在前面的模拟也发现去耦合计算南、北半球各自的电场是以周年变化为主, 且南北半球电场相位相差约半年左右 (见图 3).

这样, 给出方程 (4), (5) 中南、北半球的电势、电阻的初值后, 就可以利用 (4) 式计算去耦合时南、北半球各自的电势差, 利用 (5) 式计算南北半球耦合的电势差, 结果示于图

7. 结果显示, 南、北半球分开独立计算的电势差都只有周年变化分量, 且相位相差 180 天左右, 而耦合计算的电势差却有明显的半年变化分量, 这个结果与图 3 的情况非常相似. 并且图 7 中所示的电场从周年变化到半年变化的过程中, 我们只是改变了电路的耦合情况, 换句话说, 南北半球耦合的机制可能是电势差出现半年变化的重要原因. 另外, 由于我们假定南北半球完全对称, 耦合计算的电势差只有半年分量, 而几乎没有周年分量. 实际情况南北半球并不是如此严格对称, 这样, 耦合计算的电势差将会受到电势较强的半球控制, 不仅仅有半年变化分量, 周年变化分量也会出现. 这就与图 4 的情况一样, 即电离层电场在各个时段周年、半年幅度不同.

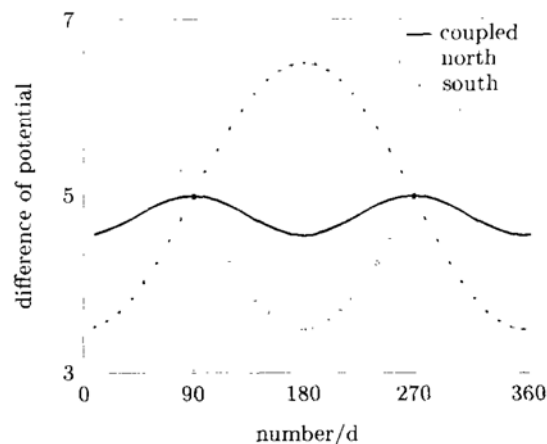


图 7 利用简化电路模型计算的电势差随天数的变化
Fig.7 Variations of the potential difference that calculated
from the circuit analysis versus the day number

从以上简化的电路模型可以清晰地看出, 由于南北半球沿磁力线耦合机制, 电离层电场应该具有一定的半年变化分量. 而使电场产生半年变化的这个因素是电离层中其他参量不具备的, 所以电离层电场半年变化应该有与电离层其他参量不同的特点. 虽然现在仍然缺少电场的观测资料, 但从物理原理上讲, 电离层电场的半年变化应该真实地存在于中低纬和赤道电离层中.

4 结果与讨论

利用一个中低纬电离层电场理论模式, 研究了电场的周年和半年变化, 其结果可以与 Richmond 的经验模式相比较, 对于模拟电场具有明显的半年变化现象, 本文也给出了合理的解释. 主要的工作可以概括如下.

(1) 在考虑和不考虑南、北半球沿磁力线耦合的两种情况下, 计算了电离层电场的周日、周年和半年的变化和形态. 结果显示, 对周日变化而言, 去耦合单独计算南、北半球的电场在大部分时段差别明显, 而耦合计算的电场一般分布在其中间, 相当于单独计算电场的平均值. 另外, 单独计算南、北半球电场的差别在冬至日大于春分日. 对于电场年变

化而言, 去耦合计算南、北半球各自的电场都是以周年变化为主, 而耦合计算的电场则半年变化分量明显加强.

(2) 利用 Richmond 的电场经验模式, 计算了电场一年的变化情况, 结果发现在大部分时段, 电场都是以半年变化为主, 这个结果和我们电场理论模式计算的结果较一致.

(3) 在合理分析了对电离层电场有重要贡献的各个因素后, 提出了一个简化的南、北半球耦合电路模型. 利用该模型可以发现, 在假定南、北半球各自的电势、电阻都是周年变化的情况下, 耦合电路的电势差可以出现较明显的半年变化分量, 其结果和电场理论模式计算的结果非常相似.

以往对电离层电场的研究, 主要集中在周日变化的形态和结构上面. 但是, 电场是否像电离层 $N_m F_2$ 等其他参量一样, 也具有更长周期的变化规律? 由于受到观测资料的限制, 这方面的工作几乎没有开展. 本文的工作为我们了解电离层电场的周年和半年变化提供了一个思路, 研究发现, 理论和经验模式给出的中低纬和赤道地区电离层电场都具有明显的半年变化规律, 并且这种半年变化现象可以利用一个简单的耦合电路模型计算出来. 因此, 我们认为, 中低纬地区电离层电场可能真实地存在着半年变化规律, 而在诸多导致电场半年变化的原因中, 磁力线在南北半球的耦合作用可能是其中重要的一个. 另外, 在中低纬度地区, 电场对电离层等离子体的结构和运动具有强烈的控制作用^{[31],[32]}, 因此电场的半年变化, 对观测到的中低纬和赤道地区电离层 $N_m F_2$ 的半年变化应该有非常显著影响, 这方面的工作将另文报道.

参 考 文 献

- [1] Titheridge J E, Buonsanto M J. Annual variations in the electron content and height of the F layer in the northern and southern hemisphere, related to neutral composition. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1983, **45**:683—696
- [2] Balan N, Otsuka Y, Bailey G J, Fukao S, Abdu M A. Annual variations of the ionosphere: A review based on the MU radar observations. *Adv. Space Res.*, 2000, **25**:153—162
- [3] Torr M R, Torr D G. The seasonal behaviour of the F₂-layer of the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1973, **35**:2237—2251
- [4] Yu Tao, Wan Weixing, Liu Libo. Global scale annual and semi-annual variations of daytime $N_m F_2$ in a high solar activity year. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2004 (in press)
- [5] Millward G H, Rishbeth H, Fuller-Rowell T J *et al.* Ionospheric F₂ layer seasonal and semiannual variations. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:5149—5156
- [6] Zou L, Rishbeth H, Muller-Wodarg I C F *et al.* Annual and semiannual variations in the ionospheric F₂-layer: I. Modelling. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**:927—944
- [7] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere F₂-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1998, **60**:1385—1402
- [8] Paetzold H K, Zschorner H. An annual and a semi-annual variation of the upper air density. *Geofis. Pura Appl.*, 1961, **48**:85—92
- [9] Cox L P, Evans J V. Seasonal variation of the O/N₂ ration in the F₁ region. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**:6271—6286
- [10] Waldeufel T. A study of seasonal changes in the lower thermosphere and their implications. *Planet. Space Sci.*, 1970, **18**:741—748
- [11] Reddi Raghava C, Geetha Ramkumar. The annual and semi-annual wind fields in low latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1997, **59**:1387—1412

- [12] Lal Chaman. Solar wind and equinoctial maxima in the geophysical phenomena. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1998, **60**:1017—1024
- [13] Ma Ruiping, Xu Jiyao, Liao Huaizhe. The characteristics and possible mechanism of semiannual variation of f_0F_2 . *Chin. J. Geophys.*, 2002, **6**:766—772. in Chinese (马瑞平, 徐奇遥, 廖怀哲. f_0F_2 半年变化的特征和一种可能机制. 地球物理学报, 2002, **6**: 766—772)
- [14] Ma Ruiping, Xu Jiyao, Liao Huaizhe. The features and a possible mechanism of semiannual variation in the peak electron density of the low latitude F_2 layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, **65**:47—57
- [15] Fejer B G, Farley D T, Woodman R F *et al.* Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar circle. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:5792—5796
- [16] Fejer B G, Farley D T, Gonzales C A *et al.* F region east-west drifts at Jicamarca. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:215—218
- [17] Fejer B G. The equatorial ionospheric electric fields- A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1981, **43**:377—386
- [18] Richmond A D, Blanc M, Emery B A *et al.* An Empirical Model of Quiet-Day ionospheric Electric Fields at middle and Low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**:4658—4664
- [19] Yu Tao, Wan Weixing, Liu Libo. A theoretical model for ionospheric electric fields at mid-and low-latitudes. *Sci. China (ser. G)*, 2003, **1**:23—31
- [20] Hedin A E, Fleming E L, Manson A H *et al.* Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**:1421—1447
- [21] Bilitza D. International reference ionosphere 1990. NSSDC/WDC-A-R&S, 1990, 90—92
- [22] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A5):1159—1172
- [23] Balan N, Otsuka Y, Bailey G J *et al.* Equinoctial asymmetries in the ionosphere and thermosphere observed by the MU radar. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:9481—9495
- [24] Suo Yuchang, Li Yongsheng, Wei Minjun. There is seasonal abnormal phenomenon in night time f_0F_2 . *Chin. J. Space Sci.*, 1989, **9**(1):64—69. in Chinese (索玉成, 李永生, 魏民军. 夜间 f_0F_2 存在季节异常现象. 空间科学学报, 1989, **9**(1):64—69)
- [25] Rishbeth H, Setty C S G K. The F -layer at sunrise. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1961, **21**:263—276
- [26] Rothwell P. Diffusion of ions between F layers at magnetic conjugate points. Proc. Intern. Conf. Ionos. Ins. Phys. Phys. Soc., London, 1963, 217—221
- [27] Johnson F S. Composition changes in the upper atmosphere. In: Thrane E ed. Electron Density Distributions in the Ionosphere and Exosphere. Amsterdam, 1964, 81—84
- [28] King G A M. The dissociation of oxygen and high level circulation in the atmosphere. *J. Atmos. Phys.*, 1964, **21**:231—237
- [29] Kelley M C. The earth's ionosphere plasma physics and electrodynamics. Academic Press, Inc, 1989, 80
- [30] Du J H and Stening R J. Simulating the Ionospheric Dynamo-II. Equatorial Electric Fields, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1999 **61**:925—940
- [31] Hanson W B, Moffett R J. Ionization transport effects in the equatorial F region. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**:5559—5572
- [32] Stening R J. Modeling the low-latitude F -region, a Review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**:1387—1412

NUMERICAL STUDY FOR THE SEMI-ANNUAL VARIATION OF ELECTRIC FIELDS AT THE MID- AND LOW-LATITUDES

YU Tao¹ WAN Weixing¹ LIU Libo¹ LEI Jiuhou¹ LI Xiaoyin²

¹(*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

²(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

With a theoretical model of ionospheric electric fields, the yearly variation of ionospheric electric fields at mid- and low-latitudes under the condition of low solar and quiet geomagnetic activities were studied. The main results are as follows: when the ionospheric electric fields are calculated individually in the northern or southern hemisphere without including the influence of the other hemisphere (uncoupled), the electric fields in both hemispheres vary in an obvious annual pattern with an anti-phase; when the electric field was calculated simultaneously in both hemispheres with the influence of the other hemispheres (coupled) included, the electric field varies in a predominant semi-annual pattern. Moreover, quite good consistency was found between the behaviors of semi-annual variation calculated by our theoretical electric field model and an empirical model of Richmond.

A simple circuit with the coupling between the northern and southern hemispheres was introduced to interpret the semi-annual variation of electric field. Results from the circuit model reveal that the coupled electric field would show a pronounced semi-annual variation due to the 'coupling effect' along the magnetic field lines between two hemispheres, whereas the uncoupled electric field have an annual variation in respective hemisphere.

Key words Ionospheric electric fields, Numerical study, Semi-annual of electric fields, Coupled circuit