第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

# 模式化分析 F 区电离层赤道异常槽*

刘立波 万卫星
(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)

**摘 要**

利用二维低纬电离层理论时变模式模拟低纬电离层演化，考察影响赤道异常槽位置的物理因素. 计算结果显示赤道槽有明显的季节、地方时和经度变化. 以 110°E 为例，北半球夏季期间赤道槽一般在磁倾赤道北侧，最北达 3°—3.5°N，而在北半球冬季期间一般位于磁倾赤道南侧，最南可达 4°—5°S. 进一步分析发现，赤道槽季节变化中光化电离率季节改变的影响很小，主要由水平中性风季节变化贡献. 计算以 83 天为例，白天赤道槽在地理经度 100°E 附近最南，285°E 附近最北，与观测特征基本一致. 主要是背景大气水平风场的经度差异导致赤道槽位置的经度变化，而非前人认为直接由磁偏角控制的.

**关键词** 电离层—赤道异常—赤道异常槽—数值模拟

## 1 引言

自发现低纬 F 区电离层赤道异常现象以来，人们通过实验观测、模式计算和理论分析等手段对其时空特征、变化规律等进行了广泛的研究 [1,2]. 其中，赤道异常南北驼峰和赤道槽的位置及其电子浓度对高层大气电波传播有着重要作用，也是构建电离层经验模式、预报空间天气必须的参数. 而且它们的变化包含着有关的物理因素信息.

探测发现，赤道槽位置并不总是位于磁赤道上空，常与磁赤道有相当的偏离 [3,4]. 1963 年 Lyon 和 Thomas[3] 给出了 1958 年间美洲和非洲扇区赤道槽所处纬度随地方时变化，Huang[4] 分析 ISS-b 和 Alouette 卫星 $f_0F_2$ 探测数据的纬度分布，揭示出赤道槽位置随经度、季节和地方时变化情况. 但是，对赤道槽的研究并不多. 本文利用低纬电离层理论模式考察赤道异常的赤道槽位置演变，分析光化电离率、经度 (地磁赤道与地理赤道间偏离、磁偏角) 、背景大气季节与经度变化等对赤道槽位置的影响.

## 2 模式及参数选取

本文所用低纬电离层理论模式 [5] 考虑了 $O^+$(计入其 $^4S$ 基态和 $^2D$ 、 $^2P$ 亚稳态能级的分叉) 、 $H^+$ 、 $He^+$ 、 $N_2^+$ 、 $O_2^+$ 、 $NO^+$ 等离子及相关的光化学和离子化学过程，出发方程 (即等离子体输运方程) 还考虑了离子间动力学耦合、静电场和地磁场共同作用引起的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移、离子与中性成分间碰撞、离子间碰撞、重力及压力梯度引起的沿磁

* 国家自然科学基金 (49804008)，重点基础研究发展规划项目 (G2000078407) 共同资助
2001-01-08 收到原稿， 2001-08-06 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

力线输运等效应. 模式首先将等离子体输运方程变换到沿磁力线和垂直磁力线方向上定义的地磁曲线坐标系下, 采取算子分裂方法处理方程, 再采用全隐差分格式差分求解.

$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移速度由 ISR 漂移模式 [6] 给出. 该漂移模式给出各纬度 300 km 高度上的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移速度, 在计算域内任一点的漂移值根据其在电离层特性得到. 地磁模型由文献 [5] 采用的偶极磁场改用 IGRF 95 国际地磁参考模式 [7]. 用 IGRF 95 给出的 Dip 纬度为磁纬, 避免用偶极磁场模型时给出的磁赤道和实际磁赤道间过大的偏离. 此外, 太阳 EUV 辐射通量、中性大气各成分浓度和水平风场、各成分温度等输入参数和模式各参数初始值的取法, 请参阅文献 [5] 介绍.

自洽模式在研究如大气层与电离层的耦合等问题有不容批驳的优势和物理上的自洽性, 而基于经验模式为输入参数的电离层模式也有其优势和合理性. 还应指出的是, 目前大多数电离层模式 [5,8] 采用经验模式作为其输入参数. 有人可能认为这种做法与物理实际过程不相符, 在物理上无意义. 但是, 实际情况并非如此, 至少存在以下不争的事实.
(1) 基于观测构建的经验模式能很好地反映实际过程, 而大多数自洽模式中作为电离层模式输入参数的部分其再现实际的能力一般要明显差于前者, 有的根本不能反映实际情况.
(2) 总体来说, 基于经验模式为部分输入参数的电离层模式模拟实际过程的能力要明显优于目前的自洽模式.

## 3 计算结果与讨论

限于 ISR 漂移模式只给出中低太阳活动条件下的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移速度 [6], 本文选取中低太阳活动 (太阳 10.7 cm 辐射通量指数 $F_{107}=99$, 81 天均值 $F_{107\mathrm{A}}=101$) 、磁静日 ($Ap=6$) 条件为代表, 利用上述低纬电离层理论模式模拟计算了给定条件下赤道槽位置的变化. 电离层 $f_0F_2$ 垂测数据和模拟计算均揭示出赤道异常在太阳活动中低年通常于 1000—1200 LT 时段形成, 比活动高年晚出现; 其约在 2100—2300 LT 时段消失, 早于活动高年. 考虑到不同情形下赤道异常出现、消失的时间差异, 我们选取 1200—2200 LT 时段进行分析.

### 3.1 随儒略日 (季节) 变化

图 1 为地理经度 110°E 处赤道异常槽位置计算值在一年内随儒略日 (季节) 和地方时变化情况. 计算结果显示出赤道槽位置明显的季节和地方时变化. 北半球夏季期间赤道槽一般在磁倾赤道北侧, 最北时可达 3°—3.5°N, 而北半球冬季一般在磁倾赤道南侧, 最南时可达 4°—5°S(见图 1). 与观测的赤道槽季节变化特征基本一致 [4]. 春秋分期间 (即第 90 天和第 270 天附近) 白天赤道槽位置相对恒定, 随时间推进赤道槽移动很少. 就赤道槽位置随地方时变化而言, 在赤道异常形成发展阶段, 赤道槽偏离磁倾赤道极向移动, 所在磁纬度与磁赤道偏离加大. 从约 1400 LT 开始, 赤道槽改向磁倾赤道移动. 在随后的某一时刻起, 赤道槽又转为偏离磁倾赤道极向移动. 对 Alouette 卫星 $f_0F_2$ 赤道槽位置季节变化的分析 [4] 揭示出 6 月至点期间赤道槽所在磁倾纬度高于其他季节, 冬季赤道槽所在位置最南. 这与本文图 1 的 110°E 处季节变化特征是一致的.

为找出导致赤道槽儒略日变化的主要因素, 分别隔离光化电离率和背景大气 (包括大气浓度和水平中性风) 的季节变化, 各因素对赤道槽位置的影响示于图 2. 光化电离率受

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

大气浓度和太阳赤纬控制. 太阳赤纬一年中在 −23.45°—23.45° 间变化. 如图 2(a) 所示, 在 1200 LT 直到 1800 LT 左右, 对给定地方时, 太阳赤纬季节变化调控光化电离率引起赤道槽位置一年内的变化幅度一般小于 0.2°, 在日落时段其变化幅度略大, 最大可到 0.6° 左右, 但仍远小于图 1 所示的赤道槽儒略日变化. 由此可见, 尽管观测数据显示在 6 月至点期间赤道槽所在磁纬最北, 但太阳赤纬季节变化不是赤道槽季节变化的主控因素. 在赤道槽季节变化中光化电离率所起作用很小, 不能使赤道槽出现如图 1 所示的季节变化特征.

背景大气季节变化对赤道槽位置影响示于图 2(b). 对照图 1 和图 2(b), 模式背景大气参数季节变化可以使赤道槽出现图 1 所示的主要特征. 其中, HWM90 模式水平中性风场和 MSIS86 模式中性大气浓度对赤道槽位置的影响分别示于图 3(a) 和 3(b) 中. 隔离其他因素, 背景中性大气浓度季节变化在 1200—2200 LT 时段给定时刻可使赤道槽位置产生约 0.5°—1° 左右的季节变化, 而背景大气水平中性风季节变化对赤道槽位置的影响要大得多, 它的影响便可使赤道槽出现如图 1 或图 2(b) 所示的变化特征.

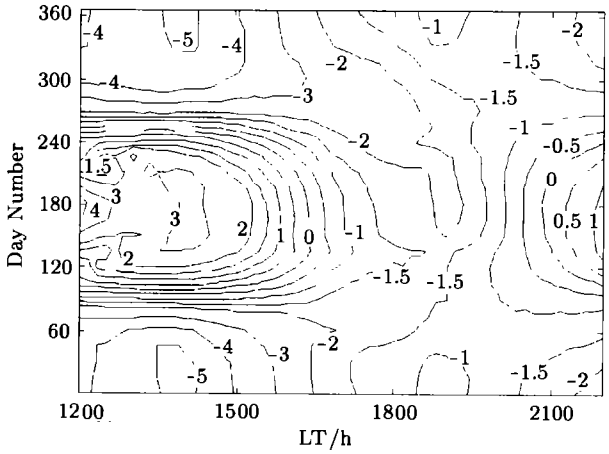



图 1　给定活动条件下经度 110°E 处赤道槽位置随儒略日 (Day Number) 和地方时变化

Fig.1　The variation of calculated trough position at longitude 110°E as functions of day number and local time

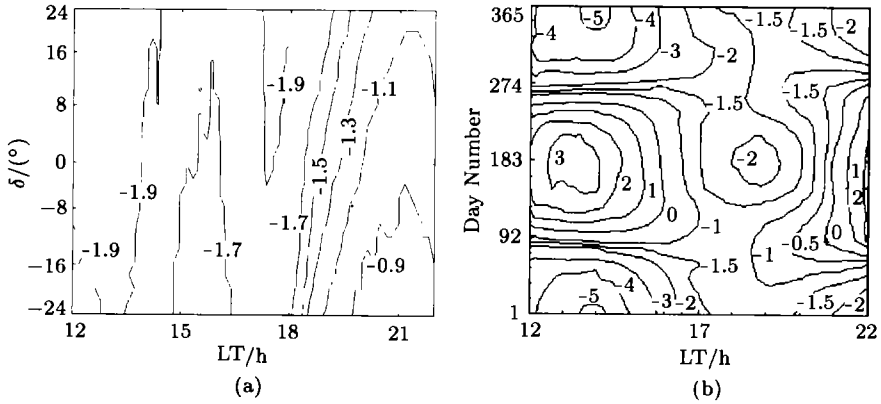



图 2　在给定活动条件下 (a) 太阳赤纬 $\delta$ 引起光化电离率变化和 (b) 大气季节变化对赤道槽位置的影响

Fig.2　The effects of seasonal variations of (a) ionic photoionization rates due to solar declination changes and (b) neutral atmospheric parameters on the location of calculated trough

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

就离子离化率 (由太阳赤纬和背景大气浓度调控) 改变和水平中性风而言，水平中性风控制赤道槽位置季节变化及太阳赤纬和背景大气浓度变化，由此调控离子离化率和等离子体运动的贡献要明显小于风的作用. Huang[4] 从经向风 (Meridional wind) 方向的日变化和季节变化与赤道槽位置移动的相关性分析，也认为风场对槽位置起重要作用.

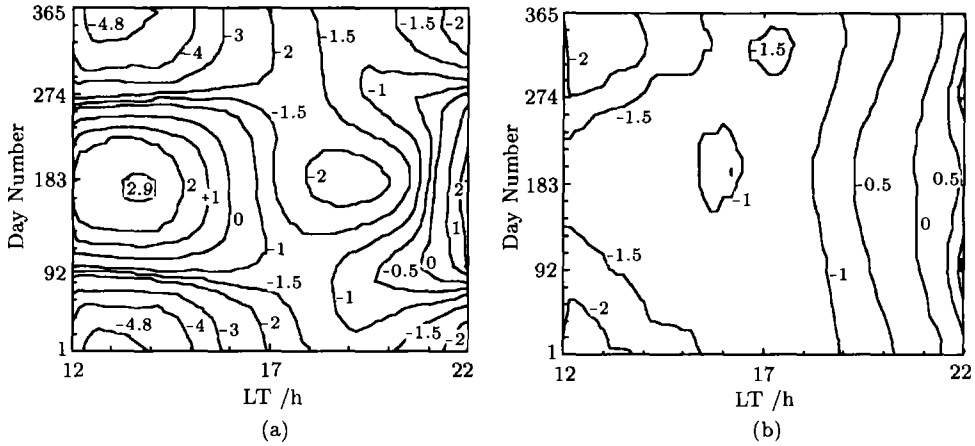



图 3 给定活动条件下 (a) 大气水平风场和 (b) 大气浓度季节变化对赤道异常槽位置的影响

Fig.3 The effects of seasonal variations of (a) neutral horizontal wind and (b) neutral concentrations on the location of equatorial trough

### 3.2 随经度变化

以第 83 天为代表，在给定活动条件下赤道槽随地理经度的变化情况示于图 4. 计算结果揭示出赤道槽位置有明显的经度变化. 从赤道槽所在磁倾纬度来看，白天在地理经度 100°E 附近赤道槽位置最南，而在地理经度 285°E 附近位置最北. 除了在 320°E—20°E 经度区赤道槽随地方时变化幅度要大一些外，其他经度区赤道槽地方时变化特征与图 1 春分期间结果相似，白天赤道槽随时间演化移动不大.

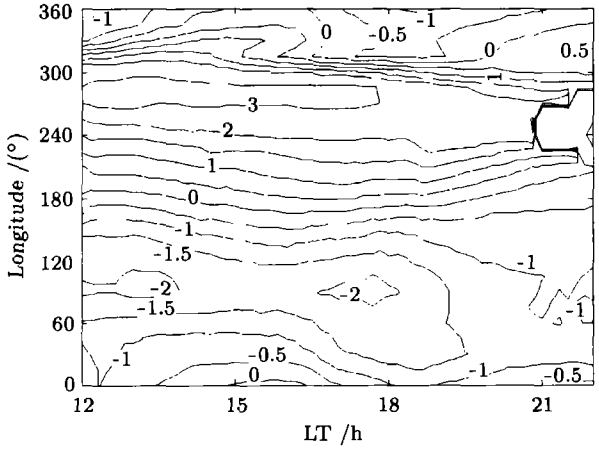



图 4 给定活动条件下在第 83 天赤道异常槽位置随地理经度和地方时变化

Fig.4 The variation of calculated trough position as functions of geographic longitude and local time on a given day

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

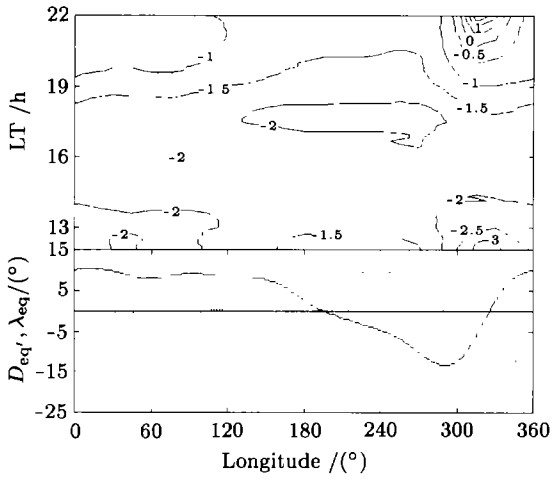



图 5　在给定活动条件下磁倾赤道与地理赤道间偏离及磁偏角经度变化对赤道槽位置的影响. 磁倾赤道的地理纬度 ($\lambda_{eq}$, 实线) 和磁偏角 ($D_{eq}$, 虚线) 随地理经度变化示于图的下半部分

Fig.5　The variation of calculated trough position due to the longitudinal variations of declination angle and the displacement between the magnetic dip equator and geographic equator. Plotted in the bottom panel is the geodetic longitudinal variations of geographicl attitudes (solid line) and magnetic declinations (dotted line) at the magnetic dip equator according to IGRF 95 model

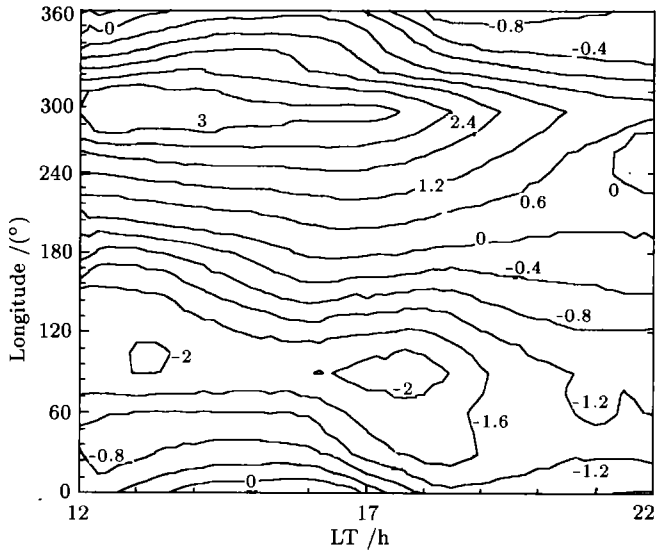



图 6　在给定活动条件下背景大气和水平中性风的经度变化对赤道槽位置的影响

Fig.6　The effects of the longitudinal variation of neutral atmospheric parameters on the location of the anomaly trough

观测和理论模拟均显示赤道槽存在经度变化. 如 Su 等 [8] 模拟分析赤道异常南北不对称经度变化的文献显示出 $f_0F_2$ 赤道槽在 120°E、220°E、283°E 和 300°E 4 个经度扇区有不同的变化, 其随经度变化特征和本文图 4 一致. ISS-b 卫星 $f_0F_2$ 数据也表明赤道槽位置存在显著经度变化 [4].

考虑到地磁赤道与地理赤道间偏离, 磁偏角及背景大气 (浓度和水平风场) 对经度的

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

依赖性，分别孤立其中一个因素，考察对赤道槽位置的影响，所得结果分别示于图 5 和图 6. 图 5 为在给定活动条件下磁倾赤道与地理赤道间偏离及磁偏角的经度变化对赤道槽位置的影响，此时背景大气参数取地理经度 110°E 值. 将磁倾赤道的地理纬度 ($\lambda_{eq}$, 实线) 和磁偏角 ($D$, 虚线) 随地理经度变化情况示于图 5 的右半部分. 磁倾赤道处的磁偏角 $D$ 在约 20°—140°E 经度区域量值很小，在 320°E 经度附近量值最大. 磁倾赤道在 340°—150°E 经度区域，所在地理纬度约为 8°—10°N，而在 180°—320°E 经度区域位于地理南半球 (图 5). 从图 5 来看，磁偏角和磁倾赤道与地理赤道间偏离引起赤道槽位置在 320°E 经度附近约 30° 的范围内存在明显的地方时变化和经度变化. 在该经度区域赤道槽随经度变幅白天为 1° 左右，而夜间可超过 2.5°，明显大于其他经度区域. 在其他经度上，磁偏角较小，尽管磁倾赤道与地理赤道间有偏离，赤道槽随经度变幅只有 0.5° 左右. 因而，磁倾赤道与地理赤道间偏离对赤道槽位置的影响可以不考虑.

磁偏角和磁赤道的地理纬度等取地理经度 110°E 值，背景大气 (中性成分浓度与水平中性风) 的经度变化所引起赤道槽位置的变化情况示于图 6. 对比图 4 和图 6，可见图 6 与图 4 所示赤道槽的经度特征基本吻合. 可以认为，造成赤道槽经度变化主要是背景大气，特别是水平中性风的经度变化.

## 4 结束语

地磁活动平静期间，影响给定太阳活动条件下赤道槽位置可能包括光化电离率、地理与地磁坐标的偏离、背景大气的季节与经度变化、赤道电急流位置等因素. 除没有考察关于赤道电急流时空分布的定量模型外，分析了其他因素对赤道槽位置的影响.

利用二维低纬电离层理论模式模拟电离层赤道异常槽在中低太阳活动条件下的演化. 计算结果显示出赤道槽有显著的地方时、儒略日和经度变化. 夏季期间赤道槽一般在磁倾赤道北侧，而在冬季期间一般位于磁倾赤道南侧，与 Huang 报道的 Alouette 卫星 $f_0F_2$ 赤道槽位置季节变化 [4] 观测特征基本一致. 进一步分离太阳赤纬改变离子光化电离率、背景大气浓度与温度、水平中性风季节变化对赤道槽位置影响的分析发现，赤道槽季节变化中以水平中性风季节变化的贡献为主，背景大气浓度与温度作用次之，太阳赤纬改变离子离化率产生的影响很小.

以第 83 天为代表，从赤道槽所处磁倾纬度的经度变化来看，白天赤道槽在地理经度 100°E 附近最南，285°E 附近最北. Huang 认为这主要为磁偏角的作用 [4]. 与其不同的是，本文计算结果表明，主要是大气水平风场的经度差异导致赤道槽位置的经度变化. 此外 330°E 经度附近区域磁偏角大的变化影响赤道槽位置，但要远弱于风的作用.

## 参 考 文 献

[1] Moffett R J. The equatorial anomaly in the electron distribution of the terrestrial F region. *Fund. Cosmic Phys.*, 1979, **4**:313—391

[2] Stening R J. Modelling the low latitude F region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**:1387—1412

[3] Lyon A J, Thomas L. The $F_2$-region equatorial anomaly in the African, American and East Asian sectors during sunspot maximum. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1963, **25**:373—386

[4] Huang C M. On the equatorial trough of $F_2$-layer ionization, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **48**(6):579—583

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[5] 刘立波，涂剑南，保宗悌. 中性风对夜间低纬电离层参量的影响. 空间科学学报， 1998, **18**(4):308—312
[6] Richmond A D *et al.* An empirical model of quiet-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(A9):4658—4664
[7] Barraclough D. International geomagnetic reference field revision 1987. *J. Geomagn. Geoele.*, 1987, **39**: 773—779
[8] Su Y Z, Bailey G J, Oyama K I, Balan N. A modelling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**(11):1299—1310

# MODELLING STUDY THE VARIATION OF THE EQUATORIAL ANOMALY IONIZATION TROUGH

LIU Libo　WAN Weixing

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*, 430071)

**Abstract**

An anomalous feature of low latitude ionosphere is the Equtorial Anomaly, and measurements show that the minimum peak density located between two crests of the Equtorial Anomaly, the equatorial anomaly trough (EAT), is not always located at near the magnetic equator. A two-dimensional theoretical low-latitude ionospheric model is used to simulate the evolution of the EAT and investigate effects of some physical factors on the location of the EAT. Each of them is adjusted respectively to study their influences on the EAT. Simulation results show that there are extinct diurnal, seasonal and longitudinal variations of the location of EAT. The EAT situates at the north of the magnetic dip equator at June solstice and shifts to the south at December solstice. It is found that the seasonal variation of the position of EAT is mainly caused by the neutral winds, not by seasonal changes in photoionization productions directly due to the variation of the geomagnetic solar zenith angle. Longitudinally speaking, the EAT lies north near 285°E and south near 100°E, which is basically consistent with previous observations. And its longitudinal variation is pricipally caused not by the magnetic declination and displacement between the geographical and magnetic equators, but by the longitudinal changes of horizontal neutral wind, which does not support the previous opinion. Only at regions near the 330°E longitudes did the magnetic declination play some larger influence on the EAT location, but it was still much smaller than that of neutral winds. In addition, the displacement between the dip equator and equatorial electrojet is not taken into account because the ionospheric model is under the dipole field assumption.

**Key words**　Ionosphere, Equatorial anomaly, Equatorial anomaly trough, Modelling study

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com