风云三号（03批）气象卫星地面应用系统工程

E星多角度电离层光度计

Tri-IPM电子浓度产品使用说明

（V1.0.0）

编写：宋茜

校对：

审核：

会签：

批准：

国家卫星气象中心

2023年3月

文档修订记录

版本号	日期	修订内容	修订人	注 记
V1.0.0	2022-04	新建	宋茜	

目 录

1 产品定义 1

2 产品规格和格式 1

2.1 产品规格 1

2.2 产品文件 1

2.3 产品科学数据集 1

3 产品算法原理和处理流程 2

3.1 算法基本原理 2

3.2 处理流程（含流程图） 3

3.2.1 输入文件 3

3.2.2 输出文件 4

3.2.3 处理流程 4

4 产品示例 5

5 产品精度 5

5.1 产品检验评估方法和数据 5

5.2 产品检验评估结果 6

6 产品使用说明 6

6.1 产品使用说明 6

6.2 应用限制条件 6

6.3 建议引用文献 6

7 产品制作及技术支持 7

1 产品定义

电子总含量（Total Electron Content，简称 TEC）定义为电子密度随高度的积分，NmF2 是 F2 层最大电子浓度，它们都是描述电离层形态和结构的重要参量。风云三号 E 星（FY-3E）多角度电离层光度计（Triple Ionospheric Photometer，简称：Tri-IPM）电子浓度产品总电子含量 TEC 和 F2 层最大电子浓度 NmF2 是利用夜间 135.6 nm 氧原子气辉观测结合太阳 F107 指数等，以氧原子气辉辐射传输函数为基础反演得出。

2 产品规格和格式

2.1 产品规格

表 2-1 Tri-IPM 电子浓度产品规格列表

产品名称	投影方式	覆盖范围	空间分辨率	产品名称	更新频次
TEC	NUL	ORBT	30KM	总电子含量	14
NmF2	NUL	ORBT	30KM	F2 层峰值电子浓度	14

2.2 产品文件

表 2-2 Tri-IPM 电子浓度产品数据文件列表

序号	文件名称	格式	周期	产品描述	关键词
1	FY3E_TRIPM_ORBT_L2_TEC_MLT_NUL_YYYMMDD_HHmm_030KM_MS.HDF	HDF	14	总电子含量	TEC
2	FY3E_TRIPM_ORBT_L2_TEC_MLT_NUL_YYYMMDD_HHmm_030KM_MS.HDF	HDF	14	F2 层峰值电子浓度	NmF2

2.3 产品科学数据集

表 2-3 Tri-IPM 电子浓度产品科学数据集

科学数据集				
分组名称	科学数据集		科学数据集名(英文)	科学数据集中文描述
	SDS1	A_Longitude	A Longitude	A 探头经度
	SDS2	A_Latitude	A Latitude	A 探头纬度

	SDS3	A_ScanTime	A ScanTime	A 探头扫描线时间
	SDS4	A_TEC	A TEC	A 探头总电子含量
	SDS5	A_NmF2	A NmF2	A 探头 F2 层最大电子浓度
	SDS6	B_Longitude	B Longitude	B 探头经度
	SDS7	B_Latitude	B Latitude	B 探头纬度
	SDS8	B_ScanTime	B ScanTime	B 探头扫描线时间
	SDS9	B_TEC	B TEC	B 探头总电子含量
	SDS10	B_NmF2	B NmF2	B 探头 F2 层最大电子浓度
	SDS11	C_Longitude	C Longitude	C 探头经度
	SDS12	C_Latitude	C Latitude	C 探头纬度
	SDS13	C_ScanTime	C ScanTime	C 探头扫描线时间
	SDS14	C_TEC	B TEC	C 探头总电子含量
	SDS15	C_NmF2	B NmF2	C 探头 F2 层最大电子浓度
*注：A、B、C 三个探头存在白天、夜间、晨昏工作模式。此数据集对应 A、B、C 探头白天模式的产品数据集，实际观测中，数据中只包括当轨道存在的工作模式。例：C 探头该轨没有白天工作模式，则 C 探头对应白天产品相关数据集不存在。				

3 产品算法原理和处理流程

3.1 算法基本原理

对于电离层，氧原子 135.6 nm 夜气辉的辐射强度主要是由 O+与电子的辐射复合过程产生：

$$O^+ + e^- \rightarrow O + hv(135.6nm) \quad (1)$$

因此，忽略 O+与 O-的中性复合($O^+ + O^- \rightarrow O^* + O(135.6nm)$)产生的对 135.6 nm 辐射强度的影响，135.6 nm 的体积发射率可简化为：

$$\varepsilon_0(z) = \gamma \alpha_{1356} n_e(z) n_{O^+}(z) \quad (2)$$

n_{O+}为氧离子密度，对体积发射率进行高度路径积分，得：

$$4\pi I = 10^{-6} \int_0^{\infty} \gamma \alpha_{1356} n_e(z) n_{O^+}(z)\, dz \quad (3)$$

n_e和n_{o^+}分别为高度 z 处电子和 O^+的密度。若假设电子和 O^+的密度相等，则上式可变为

$$4\pi I = 10^{-6} \int_0^{\infty} \gamma \alpha_{1356} n_e(z) n_e(z)\, dz \quad (4)$$

式中，γ为裂变分支比， n_e 为电子密度，α为光解复合常数，ε_0 为辐射率，z 为海拔高度，I 为观测辐射强度。若假设电子和 O_+的密度相等，则上式可简化为：

$$4\pi I = K(nmF2)^2 H \tag{5}$$

式（5）给出了最大电子密度与辐射强度的关系，H 为电离层等离子体标高，K 为光化反应速率系数有关的常数，nmF2 为电离层峰值电子密度。电子总含量 TEC 可表达为：

$$TEC = \int_0^z n_e(z)dz \tag{6}$$

由式（4），（5），（6）可知，OI 135.6 nm 夜气辉辐亮度与电离层峰值电子密度及 TEC 的平方具有很好的线性关系，

综上所述，通过电离层及大气模型提供背景廓线计算辐射强度，在特定的时空及太阳活动指数的约束下，建立峰值电子密度及 TEC 与辐亮度的回归关系，从而得到不同时空及太阳活动时的回归系数，由探测数据及相应的回归系数得到峰值电子密度及 TEC。把全球经纬度分为经度 5°和纬度 2.5 °的网格，模拟每网格的 135.6 nm 辉光的柱发射率，将每个格点的 135.6 nm 辉光柱发射率分别与 NmF2 平方、TEC 平方拟合，可以获得一条相关系数较高的回归直线，将该回归直线的斜率作为 135.6 nm 柱发射率与 NmF2、TEC 的转换因子，然后将各格点的 135.6 nm 柱发射率利用 NmF2、TEC 的转换因子，可以得到 NmF2、TEC 随经纬度的分布。

根据上述计算转换因子的方法，可获得适用不同地方时、季节和太阳活动周期的转换因子组成插值表，在对实际探测资料处理时，寻找与观测资料相对应的时间、季节和太阳活动周期时的转换因子，即可反演得到相应的 NmF2 及 TEC 值。

3.2 处理流程

3.2.1 输入文件

表 3-1 FY-3E Tri-IPM 电子浓度产品输入文件列表

序号	名称	文件格式	周期	数据来源	描述
1	Tri-IPM L1级数据	ASCII	轨	DPPS	Tri-IPM 夜间氧原子135.6 nm辐射强度

3.2.2 输出文件

表 3-2 FY-3E Tri-IPM 电子浓度产品输出文件列表

序号	产品名称	产品格式	周期	产品去向
1	TEC	HDF	轨	推送存档

3.2.3 处理流程

计算包括以下 3 个主要步骤：

(1) 将Tri-IPM 夜间135.6 nm通道的辐射强度按产品生电子浓度产品成模块要求生成准备文件；将当日太阳活动指数文件按照电子浓度产品生成模块要求生成修正系数准备文件。

(2) 按照修正系数准备文件中相关信息在静态参数文件中查找修正系数。

(3) 根据修正系数将 135.6 nm 通道的辐射强度转换为 TEC 和 NmF2，生成 Tri-IPM 电子浓度产品。

以上计算流程见下图：

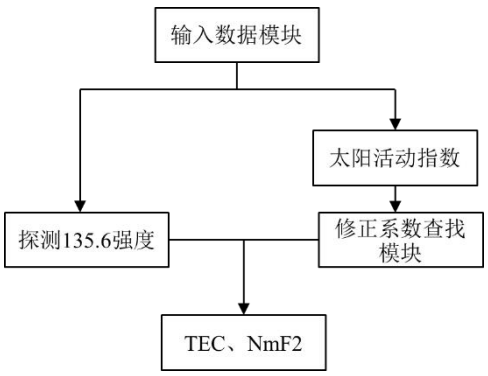

图 3-1 Tri-IPM 电子浓度产品处理流程图

4　产品示例

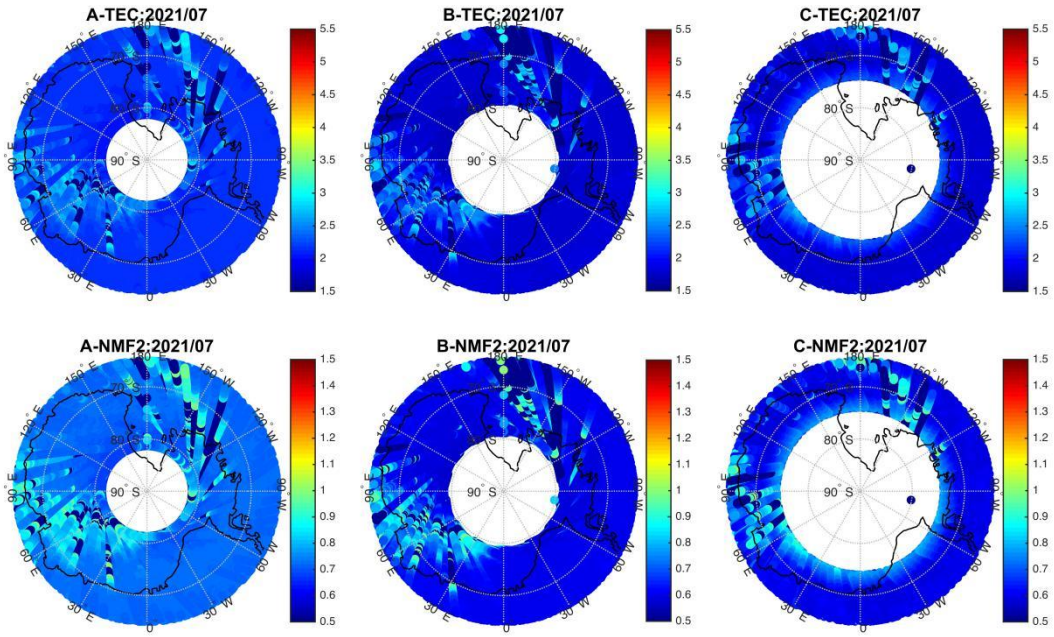

图 4-1 FY-3E Tri-IPM 三个探头 A、B、C 电子浓度产品 2021 年 7 月拼图

5　产品精度

5.1 产品检验评估方法和数据

目前由于风云三号 E 星（FY-3E）Tri-IPM 夜间观测资料有限，缺乏与 NmF2 对应（相同时段、相同位置）的测高仪观测结果，我们通过国际参考电离层模式 IRI2016 检验 NmF2 产品；TEC 产品则通过国际电离层地图 GIM 进行验证，数据时段为 2007 年 7 月。

2021 年 7 月的 Tri-IPM 电子浓度产品 TEC 与国际电离层地图 GIM 的比对结果，结果显示，二者形态和变化规律相符，但是二者相对误差达到 39.4%。这是因为 TEC 是电子密度随高度的积分，FY-3E 高度位于等离子体层以下，导致 TEC 中缺少等离子体层的贡献，而夜间等离子体层对 TEC 的贡献可达 50%以上，所以导致二者相对误差偏大。

5.2 产品检验评估结果

表 5-1 产品质量评估总结表

产品名称		业务/试验	周期（轨道、日、侯、旬、月）	空间分辨率	设计指标	实测精度
NmF2	A 探头	业务	轨道	30KM	20%	18.1%
	B 探头	业务	轨道	30KM	20%	18.7%
	C 探头	业务	轨道	30KM	20%	19.8%

6 产品使用说明

6.1 产品使用说明

FY-3E Tri-IPM 电子浓度产品为 HDF 格式，存 TEC 和 NmF2。利用读取 HDF 格式的程序，可读取产品中的扫描时间，经度，纬度、TEC 和 NmF2。读出的 TEC/NmF2 为经过缩放后的 TEC/NmF2，实际 TEC_{final}/$NmF2_{final}$ 由以下公式定义：

$$TEC_{final}=TEC*slope+intercept$$

$$NmF2_{final}= NmF2*slope+intercept$$

上式中 TEC/NmF2 为利用 Matlbab 等软件读取的 FY-3E Tri-IPM 电子浓度产品文件的数据信息，slope 值为 0.01，intercept 值为 0，存放在在 HDF 文件的属性信息中。

6.2 应用限制条件

基本假定：

（1）L1 级数据具有良好的定标和定位精度。

（2）135.6 nm 辉光主要贡献来自于辐射再结合反应，而中和反应贡献较少，不考虑中和辐射的贡献。

限制条件：

在业务应用软件中，该数学方案的限制条件为反演结果适用于极区以外区域。

6.3 建议引用文献

[1] Jiang Fang, Tian Mao et al., Observation of thermoshpere and ionosphere using the ionosphere photometer (Tri-IPM) on the Chinese meteorological satellite FY-3D, Adv. Space Res., 66(9), 2151-2167, 2020, doi:10.1016/j.asr.2020.07.027.

7 产品制作及技术支持

表 7-1 产品技术责任人列表

序号	姓名	单位	联系电话	电子邮箱	角色
1.	宋茜	国家卫星气象中心	15101017974	qsong@cma.gov.cn	产品联系人 技术负责人
2.	张晓云	华云星地通科技有限公司	13521668919	zhangxiaopyun@163.com	工程负责人