

基于 Swarm 卫星的 2022~2023 年磁平静期全球 EIA 发生率特征研究*

董驰宇^{1,2} 李婧华^{1,2} 万庆涛^{1,2} 范江涛^{1,2} 徐梓凡^{1,2} 马利华^{1,2} 马冠一^{1,2}

1(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 尽管前人已对赤道电离异常 (Equatorial Ionization Anomaly, EIA) 进行了大量研究, 但目前对太阳活动中高年不同高度、地方时段 EIA 发生率 (EIA Occurrence Rate, EOR) 的全球经度变化和季节变化的研究尚不充分。本文用太阳活动中高年 2022~2023 年磁平静期 Swarm 卫星的电子密度数据对 EOR 进行了研究, 分析了 Swarm-A/C (~462km) 和 Swarm-B (~510km) 卫星高度处不同地方时 (Local Time, LT) 时段和季节 EOR 的经度分布。结果表明: (1) A/C 卫星高度处的 EOR 一般高于 B 卫星的, 18~22LT 这种差异更明显。(2) 在 09~22LT 时段, EOR 一般呈现出春秋季节最大、夏季最低的季节变化特征。

(3) 在 13~18LT 时段, 冬季 EOR 在经度上呈现峰-3 结构, 而春秋季节和夏季的 EOR 在经度上呈现峰-4 结构。在 18~22LT 时段, 冬季 EOR 在 -50°E 有最大值; 春秋季节 EOR 经度上的变化幅度较小; 夏季 EOR 极大值出现在 -160°E 和 5°E 附近区域。

关键词 EIA, Swarm 卫星, EIA 发生率

中图分类号 P352

Characteristics of Global EIA Occurrence Rate during Geomagnetically Quiet Periods in 2022-2023 by Swarm Satellites Data

DONG Chiyu^{1,2}, LI Jinghua^{1,2}, WAN Qingtao^{1,2}, FAN Jiangtao^{1,2}, XU Zifan^{1,2}, MA Lihua^{1,2}, MA Guanyi^{1,2}.

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Although the equatorial ionization anomaly (EIA) has been widely studied,

* 国家自然科学基金面上项目 (12273062、12473095、12273074), 中国科学院-日本学术振兴会协议项目 (178GJHZ2023180MI) 共同资助。

投稿日期: 2026 年 2 月 6 日

there is little research on the global longitudinal and seasonal variations of the EIA Occurrence Rate (EOR) at different altitudes during different local times in moderate-to-high solar activity years. In this study, EOR was investigated by electron density data from Swarm satellites during the moderate-to-high solar activity years of 2022-2023 under quiet magnetic conditions. Longitudinal distributions of EOR at Swarm-A/C and Swarm-B satellite altitudes (~462km and ~510km) during different local time (LT) sectors and seasons were analyzed. Key findings include: (1) EOR values at Swarm-A/C satellite altitude are generally higher than those at Swarm-B altitude, with a more pronounced EOR difference between the two altitudes during 18-22LT compared to 09-18LT. (2) During 09-22LT, EOR values generally exhibit maxima in equinoxes and minima in summer. (3) During 13-18LT, EOR displays a three-peak longitudinal structure in winter, whereas four-peak structures emerge in equinoxes and summer. During 18-22LT, EOR peaks at -50°E in winter, while EOR shows small longitudinal fluctuations in equinoxes, and exhibits maximum values near -160°E and 5°E in summer.

Keywords EIA, Swarm satellite, EIA Occurrence Rate

0. 引言

低纬电离层是电离层变化最活跃的区域，其最显著的特征是赤道电离异常（Equatorial Ionization Anomaly, EIA），即磁赤道上空的等离子体在地球磁场 $\mathbf{B}$ 和东向电场 $\mathbf{E}$ 的 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 共同作用下垂直向上漂移，在重力作用下沿磁力线向两极输运，在磁纬 $\pm 15^{\circ}$ 附近累积，形成磁赤道附近电子密度低、 $\pm 15^{\circ}$ 附近电子密度高的现象^[1,2]。该现象向上漂移、向两级输运并形成双峰的过程也被称为“喷泉效应”^[3]，磁赤道附近电子密度低的区域为EIA槽区， $\pm 15^{\circ}$ 附近电子密度极大值区域被称为赤道异常峰或“驼峰（crests）”^[4]。EIA双峰通常出现在电子密度最高的高度附近（约250~400km）^[5]，在该高度之上，双峰结构随高度增加逐渐合并为单峰^[6,7]。

受太阳辐射的控制，EIA结构通常在10LT左右开始形成，午后EIA强度达到峰值，之后逐渐降低。日落后，受东向电场反转前增强（pre-reversal

enhancement, PRE)的作用, EIA 强度可能在当地时(local time, LT)约 20 点再次达到峰值^[8]。在一天之中, EIA 结构大约有一半时间存在^[2]。受中性成分 O/N_2 变化的影响, EIA 区域的电子密度在季节上表现出春秋季节高、夏季低的特征^[9,10]。受太阳活动周期影响, EIA 区域电子密度还表现出太阳活动高年大、低年小的太阳周期变化^[11]。

从上世纪 70 年代开始, 研究者利用测高仪数据研究了美洲、非洲和东亚等不同经度区域 EIA 的日变化和季节变化, 并发现 EIA 存在经度差异^[12]。20 世纪 90 年代, 随着全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的建立, 从 GPS 中获取电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)为研究全球电离层提供一种便利的手段^[13]。随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellites System, GNSS)的发展和广泛应用, 很多研究者利用 GNSS-TEC 研究了 EIA 区域电离层的经度变化。Wan 等^[14]用 1998~2007 年全球 TEC 的数据研究了 EIA 区域电离层结构的经度变化, 该研究表明 EIA 区域电离层在经度上存在峰-4 结构, 且峰-4 结构存在季节变化, 在北半球冬季期间峰-4 结构较弱, 而在北半球夏季和初秋期间较强。

低轨卫星的观测很好地弥补了地基观测覆盖不到海洋区域的不足, 也为电离层顶部探测提供了观测数据, 在电离层研究中得到了广泛的应用。Lin 等^[15]用 2006 年 9~10 月 FORMOSAT-3/COSMIC 得到的 TEC 数据研究了全球 EIA 区域电离层经度上的峰-4 结构的日变化, 该研究表明峰-4 结构在 10LT 前开始形成, 在下午时段最为显著。很多研究指出峰-4 结构主要源于非迁移潮 DE3^[14-17]。Kil 等^[18]用 1999~2004 年中华一号卫星的数据比较了等离子体密度和垂直漂移速度在 9 月和 12 月的经度变化, 其中 12 月的等离子体密度在经度上呈现峰-3 结构, 推测峰-3 结构来源于非迁移潮 DE2。

EIA 的发生率(EIA Occurrence Rate, EOR)是 EIA 的一个关键参数, 用于表示一个时间段和地理区域内 EIA 现象出现的频率, 已被多位学者应用。Li 等^[19]用国防气象卫星计划 F12~F15 卫星 2000~2002 年的电子密度数据研究了约 840km 高度处全球日落后时段 EIA 的发生率, 其结果表明 840km 处该时段的 EOR 最高约 30%。Wang 等^[20]用 2019 年 10 月~2020 年 10 月的欧洲定轨中心 TEC、COSMIC-2 和 Jason-3 卫星数据研究了太阳活动低年 09~15LT 时段的

EOR, 其结果表明: 11LT 和 13LT 的 EOR 在经度上存在峰-3 结构, 而 15LT 则存在峰-4 结构。

2013 年 Swarm 卫星成功发射, 它包含两组不同高度的卫星 ($\sim 462\text{km}$ 和 $\sim 510\text{km}$), 提供的空间环境数据已被很多电离层相关的研究使用^[21,22]。尽管前人已对 EIA 进行了大量研究, 但目前对不同高度太阳活动中高年不同地方时段 EIA 发生率的全球经度变化和季节变化的研究尚不充分, 因此, 本文选取太阳活动中高年 2022~2023 年 Swarm 卫星的电子密度数据, 研究了 Swarm 卫星两个高度处不同地方时段、不同季节的 EOR 全球分布特征。

本文第 1 节介绍数据来源、数据特点和研究方法; 第 2 节给出 Swarm 卫星两个高度处上午、下午和日落后三个时段 EOR 全球分布的季节变化; 第 3 节对结果进行分析讨论; 第 4 节对文章内容做总结。

1. 数据与方法

1.1 数据来源

Swarm 是欧洲航天局的一个极轨卫星项目, 由三颗结构相同的卫星构成, 分别为 Alpha (A)、Bravo (B) 和 Charlie (C)。A 和 C 卫星轨道高度约为 462km , 以在赤道处相距 1.4° 的经度差并行飞行, 倾角约为 87.4° , 轨道周期大约 93.5 分钟, 需要约 133 天实现对低纬地区 24 个地方时的全覆盖。B 卫星轨道高度约为 510km , 倾角约为 88.0° , 轨道周期大约 94 分钟, 需要约 141 天实现对低纬地区 24 个地方时的全覆盖^[23]。

本文将卫星单次穿过 $\pm 50^\circ\text{N}$ 区域的完整数据称为一段数据, 并用最接近地理赤道时的经度和 LT 来代表这段数据的经度和 LT。A 和 C 卫星有非常接近的飞行高度和 LT, 在统计分析时合用这两颗卫星的数据, 记为 A/C。B 卫星的飞行高度比 A/C 卫星高约 50km , 其观测位置和 LT 与 A/C 卫星存在差异, 为研究 EIA 在不同高度处的变化特征, 对 B 卫星的数据单独进行统计。根据 EIA 的日变化特性, 本文选用 0900~2200LT 时段的数据。图 1 给出了 2022~2023 年选用的 A/C 和 B 卫星数据段的 LT 随日期的变化, 橙色和蓝色线分别代表 A/C 和 B 卫星, 图中的断点是 Swarm 卫星数据缺失导致的。

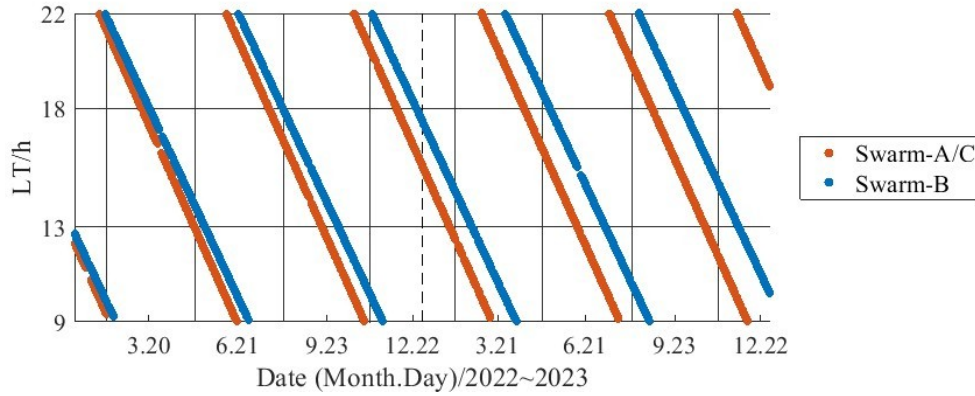


图 1 2022~2023 年 Swarm 卫星过地理赤道的 LT 随日期变化图
横轴坐标标出了 4 个分至日的日期，黑色横线和竖线分别为 LT 和季节划分范围，黑色竖虚线为 2022 与 2023 年分界线。

Fig. 1 LT variation diagram of Swarm satellite data segments during 2022-2023

The horizontal axis indicates dates of four solstices and equinoxes. Solid black horizontal and vertical lines demarcate LT and seasonal boundaries respectively and dashed black vertical line marks the division between 2022 and 2023.

本文主要使用了 Swarm 卫星 2022~2023 年地磁平静期间 ($K_p \leq 3.5$) 采样频率为 2Hz 的电子密度 (N_e) 数据开展研究工作。2022~2023 年处于太阳活动上升期，太阳 f10.7 流量平均为 $\sim 143 \text{sfu}$ ，为太阳活动中高年。按 0900~1300LT，1300~1800LT 和 1800~2200LT 三个时间段进行统计分析。在季节上，以北半球为准，按分日和至日前后各约 45 天划分春夏秋冬，第 311 天~次年第 34 天为冬季、第 127~217 天为夏季、第 35~126 天与第 218~310 天为春秋季节。图 1 中的横线和竖线分别划出了 LT 和季节的分段。从图 1 可以看出，Swarm 卫星向日面和背日面的 LT 逐日减小；A/C 与 B 卫星的 LT 差异逐渐增大，2022 年初 A/C 卫星与 B 卫星的 LT 很接近，之后 B 卫星晚于 A/C 卫星的 LT 时差逐渐增大。

1.2 研究方法

1.2.1 EIA 双峰识别方法

本文使用国际地磁参考场的第 13 代模型计算 EIA 结构的磁纬。参考 Stolle 等^[24]判断 EIA 双峰的方法，根据太阳活动中高年的数据特征，本文对每一段卫星数据识别是否存在 EIA 的步骤如下：

- (1) 在磁纬 $\pm 5^\circ$ 内寻找最小 N_e 值的位置，记为“min 点”；
- (2) 在 min 点南北两侧地理纬度 $\pm 50^\circ \text{N}$ 范围内分别寻找最大 N_e 值的位置，记为“max 点”；

(3)若两侧都能找到 max 点，且两个 max 点都满足以下四个条件：①与 min 点的 Ne 差大于 $10^5/\text{cm}^3$ 、②与 min 点的地理纬度间距大于 1.5° 、③两个 max 对应的地理纬度间距大于 6° 、④在磁纬 $\pm 25^\circ$ 范围内，则认为存在双峰，形成了 EIA 结构。

按此步骤，对 2022~2023 年 09~22LT 的 32047 段进行了判断，共识别出 16857 段数据存在 EIA 结构。图 2 是 A/C（左）和 B 卫星（右）高度处典型的 EIA 结构。A/C 卫星的轨道高度（462km）比 B 卫星（510km）低约 50km，在接近的时间和经度范围内，A/C 观测到的 Ne 比 B 卫星大。

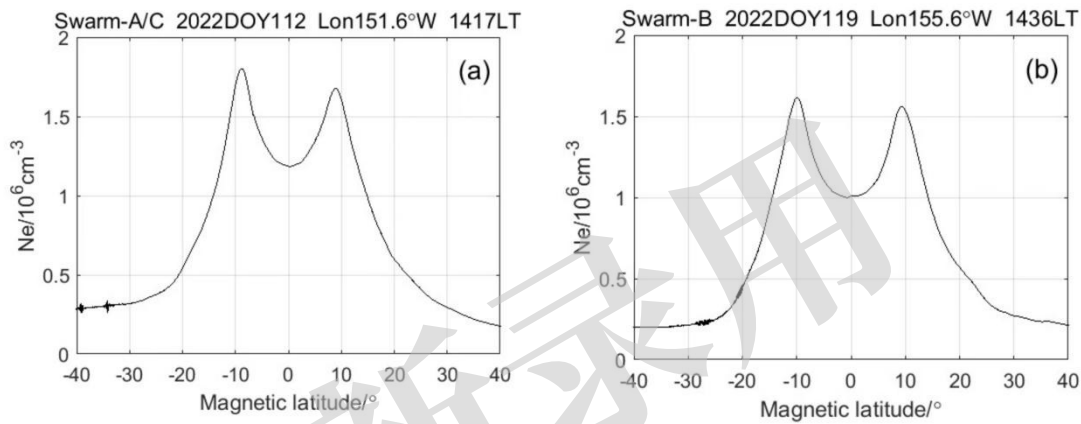


图 2 A/C 和 B 卫星高度处典型 EIA 双峰结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical EIA double-peak structure at Swarm-A/C and Swarm-B altitudes

1.2.2 EOR 统计方法

在全球范围内，定义 15° 经度范围内形成 EIA 的数据段数与总观测数据段的比值为该经度带内的 EOR，并采用 5° 的滑动步长对 15° 的经度范围内的 EOR 进行滑动计算。对各季节和时间段，每个经度带内 A/C 卫星观测数据段数的中位数为 88，最小值为 51；B 卫星中位数为 46，最小值为 21。

2. 结果

2.1 09~13LT 时段的 EOR 特征

图 3 展示了 A/C 和 B 卫星高度处全球范围内 09~13LT 的 EOR 季节变化，其中左列是 A/C 卫星的结果，右列是 B 卫星的结果，从上到下分别是冬季、春秋

季节和夏季的结果，横虚线是各季节 EOR 全球经度上的平均值。A/C 卫星冬季 09~13LT 观测到的 EOR 全球经度平均值为 38%，超过平均值的区域主要是-180°E 至-105°E 区域，该区域的 EOR 明显比其它区域的高，其中-130°E 处有 EOR 最高值 79%。A/C 卫星春秋季节 09~13LT 观测到的 EOR 全球经度平均值为 46%，比冬季的高；夏季的 EOR 经度平均值仅为 28%，比冬季和春秋的低。

B 卫星 EOR 经度平均值在春秋季节最高，冬季次之，夏季最低，与 A/C 卫星的特征一致，并且两个卫星高度的 EOR 在各个季节的经度变化特征相近。与 A/C 卫星（462 km）的结果对比，B 卫星（510 km）各季节的 EOR 全球经度平均值都比 A/C 卫星的低 9% 左右。

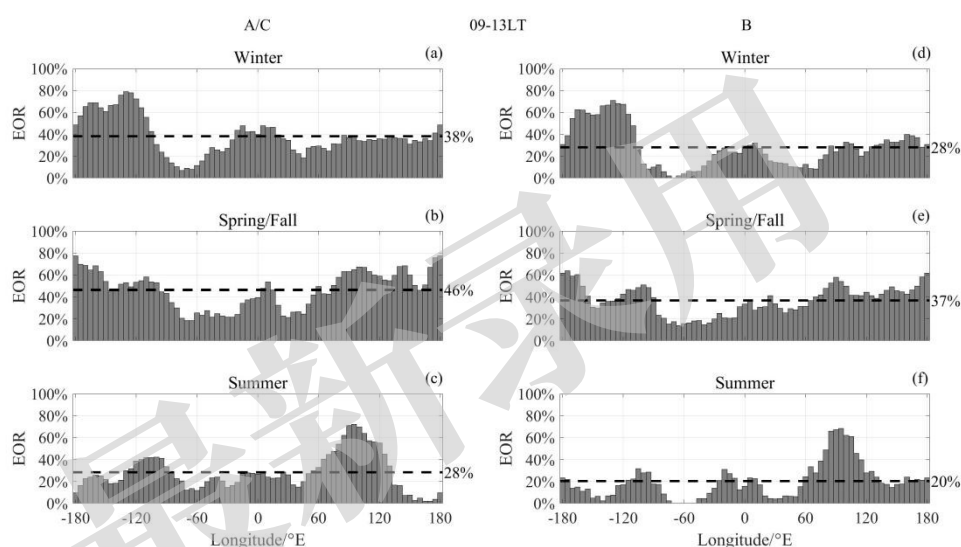


图 3 A/C 和 B 卫星高度处 09~13LT 全球 EOR 的季节变化图

横虚线是 A/C 或 B 卫星各季节 EOR 全球经度上的平均值。

Fig. 3 Seasonal variations of global EOR during 09-13 LT at Swarm-A/C and Swarm-B altitudes
Horizontal dashed lines indicate the longitudinally averaged EOR values for each season at respective satellite altitudes.

2.2 13~18LT 时段的 EOR 特征

图 4 展示了 A/C 和 B 卫星高度处全球范围内 13~18LT 的 EOR 季节变化，其格式与图 3 一致。A/C 卫星冬季 13~18LT 观测到的 EOR 在-135°E、-40°E 和 95°E 存在 3 个极大值；春秋季节的 EOR 在-170°E、-95°E、5°E 和 110°E 存在 4 个极大值；夏季的 EOR 在-150°E、-90°E、15°E 和 115°E 存在 4 个明显的区域极大值。冬季、春秋季节和夏季的 EOR 经度平均值分别是 57%、68%和 40%，春秋季节的经度平均值最大，冬季次之，夏季最低。

B 卫星冬季的 EOR 在 -160°E 、 -5°E 和 115°E 存在 3 个区域极大值，。春秋季节的 EOR 在 -165°E 、 -85°E 、 10°E 和 105°E 存在 4 个区域极大值，夏季的 EOR 在 -165°E 、 -100°E 、 10°E 和 105°E 也存在 4 个区域极大值。B 卫星与 A/C 卫星观测到的 EOR 经度分布特征相近。

B 卫星与 A/C 卫星的 EOR 经度平均值差值在春秋季节为 15%，大于冬、夏两季二的差值。B 卫星冬季的 EOR 经度平均值最高，这与 A/C 卫星春秋季节的 EOR 经度平均值最高的特征不同。

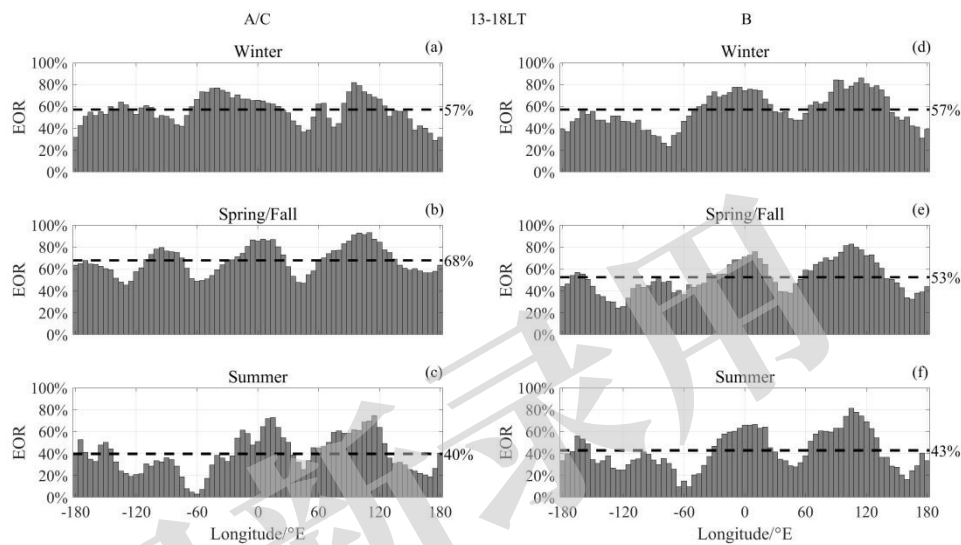


图 4 A/C 和 B 卫星高度处 13~18LT 全球 EOR 的季节变化图

横虚线是 A/C 或 B 卫星各季节 EOR 全球经度上的平均值。

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 13~18LT

2.3 18~22LT 时段的 EOR 特征

图 5 展示了 A/C 和 B 卫星高度处全球范围内 18~22LT 的 EOR 季节变化，其格式与图 3 一致。A/C 卫星冬季 18~22LT 观测到的 EOR 经度平均值为 66%，在 -50°E 有最大值 97%， -50°E 西侧下降得比东侧快，在 -155°E 有最小值 33%。A/C 卫星春秋季节 18~22LT 观测到的 EOR 经度平均值达到 79%，最高值为 97%，最小值为 64%，整体较高。A/C 卫星夏季 18~22LT 观测到的 EOR 经度平均值为 39%，明显比冬季和春秋季节低。与白天的结果相比，冬季和春秋季节 18~22LT 的 EOR 经度平均值明显更大，而在夏季，18~22LT 的 EOR 经度平均值比 09~13LT 的大，与 13~18LT 的大小相当。

B 卫星 EOR 经度平均值在春秋季节最高，冬季次之，夏季明显最低，与 A/C 卫星的特征一致。B 卫星冬季的 EOR 与 A/C 卫星一样在 -50°E 有最大值，

为 96%，在-50°E 东西两侧，B 卫星的 EOR 下降得比 A/C 卫星的快，在 65~105°E 区域，B 卫星的 EOR 都不超过 30%，最低的只有 3%。B 卫星春秋季节和夏季 18~22LT 的 EOR 的经度变化与 A/C 的形态相近。与 A/C 卫星相比，B 卫星的 EOR 经度平均值明显低于 A/C 卫星的。与 13~18LT 的结果相比，B 卫星 18~22LT 的 EOR 经度平均值在冬、夏两季明显低于 13~18LT 的，而在春秋季节高于 13~18LT 的。

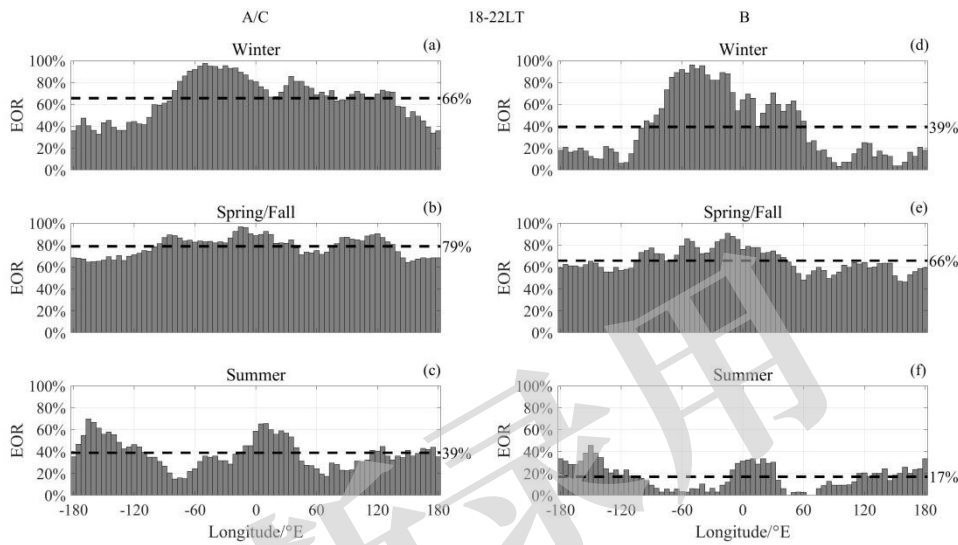


图 5 A/C 和 B 卫星高度处 18~22LT 全球 EOR 的季节变化图
横虚线是 A/C 或 B 卫星各季节 EOR 全球经度上的平均值。

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for 18~22LT

3. 讨论

EIA 的发生率在 A/C 卫星和 B 卫星高度处有明显差异，并呈现明显的季节、地方时段和经度变化：

对比 A/C 卫星（462km）与 B 卫星（510km）高度的 EOR 结果，B 卫星高度的 EOR 绝大部分时候比 A/C 的低。Swarm 卫星高度在电离层电子密度峰值高度之上，B 卫星的轨道高度比 A/C 高约 50km，因此 B 卫星高度处的 EOR 普遍低于 A/C 卫星高度处的。在 09~13LT，B 卫星的 EOR 经度平均值比 A/C 的低 9%左右，这说明上午时段 B 卫星的高度处的 EIA 形成得没有 A/C 卫星高度处的充分。在 13~18LT，B 卫星冬、夏两季的部分经度的 EOR 大于 A/C 卫星的，这

可能是 A/C 和 B 卫星并非同时同地测量，观测数据采样时间和地点存在差异导致的。在春秋季节，B 卫星与 A/C 卫星的 EOR 经度平均值差值为 15%，大于冬、夏两季的差值，这可能是因为两个 Swarm 卫星高度处，下午时段春秋季节的 EIA 双峰区域电子密度高度变化比冬、夏两季大。Xiong 等^[25]对 2001~2009 年 CHAMP (~400km) 和 GRACE (~480km) 卫星电子密度数据的研究表明，在太阳活动中高年，冬、夏两季双峰平均电子密度在 CHAMP 卫星和 GRACE 卫星高度处的差值小于 $0.75 \times 10^6/\text{cm}^3$ ，而春秋季节该差值大于 $10^6/\text{cm}^3$ 。在 18~22LT，B 卫星冬季、春秋季节和夏季 EOR 经度平均值分别是 39%、66% 和 17%，它们都比同季节 A/C 卫星的结果小 15% 以上。日落后 A/C 和 B 卫星高度处的 EOR 差距比白天的明显，这可能与日落后电子密度随光电离作用的消失而下降有关，电子密度的下降使得高度较高处难以累积足够形成 EIA 结构的等离子体。Li 等^[19]给出了太阳活动高年约 840km 高度处全球日落后时段各季节的 EOR，结果表明冬季和春秋季节绝大部分经度区域 EOR 低于 20%，夏季低于 3%。尽管处于太阳活动高年，也明显低于 Swarm 卫星高度处的 EOR 结果。Swarm 卫星两个高度的 EOR 对比表明，A/C 卫星高度处的 EOR 一般高于 B 卫星的，18~22LT 这种差异更明显。以往的研究没有同时统计过白天和夜间的 EOR 结果，因此该特征尚未被揭示。

EOR 季节变化方面，对同一地方时段，大部分情况下 EOR 经度平均值在春秋季节最高，冬季次之，夏季最低。 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 垂直向上漂移是 EIA 形成的主要驱动源，其在春秋季节最强，冬季次之，夏季最低^[27]。此外，电离层电子密度是 EIA 形成的重要背景条件，其季节变化主要与 O/N_2 有关， O/N_2 越高，电子密度一般越高^[9,10]。 O/N_2 同样在春秋季节最强，冬季次之，夏季最低^[26]。在 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 垂直向上漂移和电子密度的共同影响下，EOR 经度平均值也呈现与它们一致的季节变化。B 卫星 13~18LT 冬季的 EOR 经度平均值比春秋季节略高，这可能是冬季和春秋季节观测的地方时不完全一样所致，需进一步观测验证。

在不同地方时段，EOR 经度上的平均值有较大差异。在 09~13LT 时段，EOR 经度平均值较低，13~18LT 时段的 EOR 经度平均值明显比 09~13LT 时段的高。该结果与 EIA 在早上开始形成、午后强度达到峰值的结论相符。18~22LT 时段，EOR 经度平均值在春秋季节比 13~18LT 时段的高，而在夏季比 13~18LT

时段的低。这种差异可能是电子密度和 PRE 导致的 $E \times B$ 垂直向上漂移的季节变化所致。在春秋季节，电子密度较高且 PRE 导致的 $E \times B$ 垂直漂移较强，而在夏季，电子密度较低且垂直漂移弱于春秋季节^[27,28]。冬季 18~22LT 时段 EOR 经度平均值与 13~18LT 时段相比，在不同高度处变化不同：在 A/C 卫星高度处日落后的 EOR 经度平均值较高，B 卫星高度处日落后的 EOR 经度平均值较低。冬季日落后的 EOR 具有很强的经度效应，在 -90°E~60°E 区域高于其它经度区域，且高于下午时段的 EOR。冬季日落后的垂直漂移速度最大值也出现在美洲-非洲扇区，且高于白天^[27]；赤道等离子体泡的发生率也在此经度范围内最大^[29~32]。冬季日落后垂直漂移速度的强经度效应可能是导致 EOR 与下午时段不同的主要原因。

EIA 主要是在 $E \times B$ 驱动的喷泉效应下产生的，因此 EOR 的地方时段、季节和经度变化与等离子体垂直漂移速度的时空变化显著相关。在白天，EOR 呈现 3 次或 4 次起伏变化。其中 3 次起伏变化出现在冬季，与 Kil 等^[18]给出的峰-3 结构特征一致；而 4 次起伏变化出现在春秋季节和夏季，与 Wan 等^[14]给出的峰-4 结构特征一致。早午时段的垂直漂移速度在经度上存在 3 个（冬季）或 4 个（春秋季节和夏季）极大值区域^[27]，且这些区域的位置与 EOR 经度上的峰值位置相近。以往研究尚未按季节统计白天 EOR 的经度变化。Wang 等^[20]给出了太阳活动低年全年 11,13 和 15LT（不区分季节）的 EOR 经度变化：11LT 和 13LT 的 EOR 在经度上存在 3 个明显的区域极大值；而 15LT 则存在 4 个。低年 15LT 大部分经度 EOR 低于 40%，整体比中高年 13~18LT 的 EOR 低。对于春秋季节和夏季的结果，13~18LT 的 EOR 峰-4 结构比 09~13LT 的明显，这与 Lin 等^[15]给出的峰-4 结构地方时变化特征一致。在 18~22LT 时段，冬季的 EOR 在 -50°E 有最大值，春秋季节的 EOR 经度上的变化幅度较小，夏季的 EOR 在 -160°E 和 5°E 附近区域较大。Li 等^[19]给出的太阳活动高年日落后不同季节 EOR 经度变化特征与中高年的较为一致。在日落时段，冬季的垂直漂移速度在 -80°E~-20°E 区域较大，春秋季节的垂直漂移速度经度上的变化幅度较小，夏季的垂直漂移速度在 -160°E 和 5°E 附近区域较大^[27]，与 EOR 的经度变化特征一致。

4. 总结

本文研究了全球 Swarm-A/C 和 Swarm-B 卫星高度处的 EOR 在不同地方时

段和季节的变化特征，并对这些结果做了分析，由此更进一步展现了 EOR 的时空变化特征，解释了它们的物理机制。本文的主要结果如下：

1. Swarm-A/C 和 Swarm-B 卫星高度处全球不同地方时段和季节的 EOR 结果表明，A/C 卫星高度处（~462km）的 EOR 一般高于 B 卫星（~510km）的，18~22LT 这种差异更明显。
2. 在不同季节，EOR 的大小存在明显差异。在 09~22LT 时段，EOR 一般呈现出春秋季节大、冬季次之、夏季最低的季节变化特征。
3. 在不同地方时段和季节，EOR 的经度分布有明显差异。在 13~18 LT 时段，冬季 EOR 在经度上呈现峰-3 结构，而春秋季节和夏季的 EOR 在经度上呈现峰-4 结构。在 18~22LT 时段，冬季 EOR 在-50°E 有最大值；春秋季节 EOR 经度上的变化幅度较小；夏季 EOR 极大值出现在-160°E 和 5°E 附近区域。

本文只选用了 Swarm 卫星 2022~2023 年两年的数据来对 EOR 进行研究，为更好地理解 EIA 的特征，后续会利用更多年份、更多种类的数据来描述 EIA 参数、对 EIA 的时空变化特征进行研究。

致谢 本文所用 Swarm 电子密度数据来自 Swarm 卫星数据下载官网（<https://swarm-diss.eo.esa.int/>）；Kp 指数和 f10.7 指数数据来自 NASA 的 OMINWeb（<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>）。对数据提供机构致以诚挚感谢。

参考文献:

- [1] APPLETON E V. Two anomalies in the ionosphere[J]. *Nature*, 1946, 157(3995): 691. DOI:10.1038/157691a0.
- [2] BALAN N, LIU L B, LE H J. A brief review of equatorial ionization anomaly and ionospheric irregularities[J]. *Earth Planet. Phys.*, 2018, 2(4): 1-19. DOI:10.26464/epp2018025.
- [3] DUNCAN R A. The equatorial F-region of the ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1960, 18(2-3): 89-100. DOI:10.1016/0021-9169(60)90081-7.
- [4] VILA P. Intertropical F2 ionization during June and July 1966[J]. *Radio Sci.*, 1971, 6(7): 689-697.
- [5] CHEN Y, LIU L, LE H, et al. Equatorial ionization anomaly in the low-latitude topside ionosphere: Local time evolution and longitudinal difference[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(7): 7166-7182. DOI:10.1002/2016JA022394.
- [6] HANSON W B, MOFFETT R J. Ionization transport effects in the equatorial F region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(23): 5559-5572. DOI:10.1029/JZ071i023p05559.
- [7] HUANG H, LU X, LIU L, et al. Transition of interhemispheric asymmetry of equatorial ionization anomaly during solstices[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(12). DOI:10.1029/2018JA026055.
- [8] RISHBETH H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region[J]. *Planetary and Space Science*, 1971, 19(3): 357-369. DOI:10.1016/0032-0633(71)90098-5.
- [9] AGGARWAL M, JOSHI H P, IYER K N, et al. Day-to-day variability of equatorial anomaly in GPS-TEC during low solar activity period[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49: 1709-1720. DOI:10.1016/j.asr.2012.03.005.
- [10] HE L, ZHU Q, WANG C. Comprehensive analysis of the equatorial ionization anomaly based on global ionospheric maps with a high spatiotemporal resolution[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(8): 3511-3526. DOI:10.1016/j.asr.2024.06.047.
- [11] LIU H, STOLLE C, FÖRSTER M, et al. Solar activity dependence of the

- electron density in the equatorial anomaly regions observed by CHAMP[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: A11311. DOI:10.1029/2007JA012616.
- [12] WALKER G O. Longitudinal structure of the F-region equatorial anomaly - A review[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1981, 43(8): 763-774. DOI:10.1016/0021-9169(81)90052-0.
- [13] MANNUCCI A J, WILSON B D, YUAN D N, et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements[J]. *Radio Science*, 1998, 33(3): 565-582. DOI:10.1029/97rs02707.
- [14] WAN W, LIU L, PI X, et al. Wavenumber-4 patterns of the total electron content over the low latitude ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(12): L12104. DOI:10.1029/2008GL033755.
- [15] LIN C H, HSIAO C C, LIU J Y, et al. Longitudinal structure of the equatorial ionosphere: Time evolution of the four-peaked EIA structure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(A12): A12305. DOI:10.1029/2007JA012455.
- [16] REN Z, WAN W, LIU L, et al. Intra-annual variation of wave number 4 structure of vertical $E \times B$ drifts in the equatorial ionosphere seen from ROCSAT-1[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(A5): A05308. DOI:10.1029/2009JA014060.
- [17] REN Z, WAN W, XIONG J, et al. Simulated wave number 4 structure in equatorial F-region vertical plasma drifts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(A5). DOI:10.1029/2009JA014746.
- [18] KIL H, PAXTON L J, LEE W K, et al. Is DE2 the source of the ionospheric wave number 3 longitudinal structure?[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: A11319. DOI:10.1029/2010JA015979.
- [19] LI J, CHEN Y, LIU L, et al. Occurrence of Ionospheric Equatorial Ionization Anomaly at 840 km height observed by the DMSP satellites at solar maximum dusk[J]. *Space Weather*, 2021, 19: e2020SW002690. DOI:10.1029/2020SW002690.
- [20] WANG K, FENG J, ZHANG T, et al. Characterization and modeling of EIA crest and trough positions using multiple-source fused data during the solar minimum period[J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2025, 130: e2024JA033558. DOI:10.1029/2024JA033558.
- [21] ALKEN P, MAUS S, CHULLIAT A, et al. Swarm equatorial electric field chain: First results[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, 42(3): 673-680. DOI:10.1002/2014GL062658.

- [22] HUANG Y, XIONG C, WAN X, et al. The third plasma density peak at poleward of EIA crest: Swarm and ICON observations[J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2024, 129: e2023JA032035. DOI:10.1029/2023JA032035.
- [23] VAN DEN IJSSEL J, ENCARNACÃO J, DOORNBOS E, et al. Precise science orbits for the Swarm satellite constellation[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1042-1055.
- [24] STOLLE C, MANOJ C, LÜHR H, et al. Estimating the daytime Equatorial Ionization Anomaly strength from electric field proxies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: A09310. DOI:10.1029/2007JA012781.
- [25] XIONG C, LÜHR H, MA S Y. The magnitude and inter-hemispheric asymmetry of equatorial ionization anomaly-based on CHAMP and GRACE observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 105-106: 160-169. DOI:10.1016/j.jastp.2013.09.010.
- [26] BALAN N, SOUZA J R D, BAILEY G J. Recent developments in the understanding of equatorial ionization anomaly: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, 171: 3-11. DOI:10.1016/j.jastp.2017.06.020.
- [27] FEJER B G, JENSEN J W, SU S Y. Quiet time equatorial F region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 observations[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: A05304. DOI:10.1029/2007JA012801.
- [28] FESEN C G, CROWLEY G, ROBLE R G, et al. Simulation of the pre-reversal enhancement in the low latitude vertical ion drifts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1851-1854. DOI:10.1029/2000GL000061.
- [29] GONZÁLEZ G. Global patterns of equatorial plasma bubbles from ICON data[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 76(4): 2265-2279. DOI:10.1016/j.asr.2025.06.055.
- [30] 赵秀宽, 李国主, 胡连欢, 等. 基于 GNSS 观测的全球赤道等离子体泡对太阳和地磁活动及季节依赖特征[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(7): 2703-2712.
- [31] 杨璐冰, 蔡红涛, 熊超, 等. 基于 Swarm 数据的全球中低纬等离子不规则体统计分析[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(10): 3675-3691. DOI:10.6038/cjg2024S0620.
- [32] TSAI L C, SU S Y, SCHUH H, et al. Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by FormoSat-7/Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate II and relevant to the Rayleigh-Taylor instability[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(13): 2310. DOI:10.3390/rs16132310.

第一作者简介:

董驰宇 男, 2000 年 12 月出生于云南省昆明市, 现为中国科学院国家天文台博士研究生, 主要研究方向为低纬电离层时空变化特征等。

E-mail: dongchiyu19@mailsucas.ac.cn



通讯作者简介:

李婧华 女, 1983 年出生于河南, 现为中国科学院国家天文台应用天文学部高级工程师, 硕士生导师, 主要从事卫星导航与通信、电离层物理、电离层对卫星导航的影响等相关研究工作。

E-mail: jhli@bao.ac.cn

