Draft version February 9, 2023 年，使用
AASTeX63 的 LaTeX 双栏样式排版

arXiv:2302.03804v1 [astro-ph.SR] 7 Feb 2023

成分 n 活动区与宁静太阳区来源的行星际日冕物质抛射比较

Jinrong Li,[1] Hongqiang Song,[1] Qi Lv,[1] Hui Fu,[1] Leping Li,[2] Ruisheng Zheng,[1] and Yao Chen[1,3]

[1] *Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, and Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China*
[2] *CAS Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing,* 100101, *China*
[3] *Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China*

（收稿日期：***，****；修订日期：***，****；接收日期：***，****）

已提交至《天体物理学杂志》

摘要

行星际日冕物质抛射（ICME）中的成分，包括重元素的离子电荷态和元素丰度，与其源区和爆发过程密切相关。这有助于分析日冕物质抛射（CME）的爆发机制和等离子体起源，并加深我们对太阳高能活动的理解。活动区和宁静太阳区具有不同的物理性质，因此从统计角度来看，起源于这两类区域的行星际日冕物质抛射应呈现不同的成分特征。为全面展示这些差异，我们利用先进成分探测器的数据，对1998年2月至2011年8月期间行星际日冕物质抛射中的五种元素（镁、铁、硅、碳和氧）的离子电荷态，以及六种元素比值（镁/氧、铁/氧、硅/氧、碳/氧、氖/氧和氦氧比）进行了综述研究。结果表明，来自活动区的行星际日冕物质抛射，其离子电荷态和相对丰度均高于来自宁静太阳区的行星际日冕物质抛射。对于活动区日冕物质抛射，我们进一步分析了其成分与耀斑等级之间的关系，发现二者呈正相关：相关耀斑的等级越高，行星际日冕物质抛射中的离子电荷态和相对丰度（碳/氧除外）的均值就越大。由于太阳活动极大期（极小期）前后，起源于活动区的行星际日冕物质抛射所占比例较高（较低），且活动区日冕物质抛射通常与等级较高的耀斑相关，因此我们的研究或可解释为何在1天文单位附近测得的行星际日冕物质抛射成分表现出太阳活动周依赖性。

*Keyw*词：太阳日冕物质抛射 – 太阳暗条爆发 – 磁重联

1. 引言

行星际日冕物质抛射（ICME；Manchester et al. 2017）是日冕物质抛射（CME；Forbes 2000；Forbeset al. 2006）的对应现象，它们源于磁通量绳（MFR；Chen 2011；Webb &Howard 2012）的爆发；磁通量绳可在爆发前（Cheng et al. 2011；Patsourakoset al.2013）及爆发期间（Song et al. 2014；Ouyang et al. 2015；Wang et al.2017）形成。行星际日冕物质抛射会造成极端空间天气影响，并影响人类的高科技活动（Gosling et al. 1991；Zhang etal. 2007；Xu et al. 2019）。研究日冕物质抛射和行星际日冕物质抛射有助于我们预测空间天气，并及时采取防范措施以减少损失。

行星际日冕物质抛射的成分，指重元素的离子电荷态和相对丰度，可通过原位测量直接获得。由于行星际日冕物质抛射在行星际空间传播过程中成分不会改变（例如，Owens 2018），因此，位于1天文单位处和太阳附近的行星际日冕物质抛射具有相同的电荷态和元素丰度，这些特征反映了日冕物质抛射的爆发特征和等离子体起源。因此，行星际日冕物质抛射的原位成分为研究日冕物质抛射开辟了一条重要途径（近期综述见Song 与 Yao (2020)）。

根据日冕物质抛射模型（例如，Lin &Forbes2000），电流片中经磁重联加热的等离子体会与重联后的磁力线一起，转变为磁通量绳的外壳

通讯作者：Hongqiang Songhqsong@sdu.edu.cn

（Song 等人 2015, 2016；Ye 等人 2021）。随着日冕物质抛射向外传播，其电子密度迅速降低。当密度足够低时，电离和复合过程将停止，使离子电荷态冻结（Owocki 等人 1983）。因此，可利用 1 天文单位附近的离子电荷态推断太阳附近的电子温度、电子密度以及行星际日冕物质抛射速度信息（Landi 等人 2012）；关于其他背景下的讨论，另见 Shi 等人（2019）。对于金属元素，如镁、铁和硅，其离子电荷态平均值，即 $< Q_{Mg} >$、$< Q_{Fe} >$和 $< Q_{Si} >$，对电子温度较为敏感（Lepri 等人 2001；Lepri 和 Zurbuchen 2004；Lepri 等人 2013）。对于非金属元素，如碳和氧，电荷态比值，例如 C^{6+}/C^{5+}、C^{6+}/C^{4+} 和 O^{7+}/O^{6+}，可用于指示冻结时日冕源区的温度（Zhao 等人 2014, 2017a）。

行星际日冕物质抛射的元素丰度也被用于诊断一些与日冕物质抛射相关的问题，例如等离子体起源（Song 等人 2017），这是由于第一电离势效应。第一电离势效应是发生在太阳光球与日冕之间的元素分馏。低第一电离能元素（例如镁、铁、硅）流入日冕时，其丰度相较于高第一电离能元素（例如氧）会增加。这使得诸如铁/氧这样的相对丰度在日冕中更高（Laming 2004，2009，2015）。因此，以往的研究通过将行星际日冕物质抛射等离子体的元素丰度与光球值进行比较，来探究其来源。例如，Lepri 和 Rivera(2021) 报告称，日珥的元素丰度与光球值相近，这不支持日珥物质起源于日冕等离子体的凝结这一观点。

近年来，人们对行星际日冕物质抛射成分开展了许多综述研究。Zurbuchen 等人 (2016) 报告称，铁电荷态较高的行星际日冕物质抛射，其FIP分馏程度高于其他行星际日冕物质抛射。Owens (2018) 和 Huang 等人 (2020) 发现，与慢速行星际日冕物质抛射相比，快速行星际日冕物质抛射具有更高的电荷态和相对丰度。Gu 等人 (2020) 和 Song 等人 (2021) 表明，日冕物质抛射成分呈现出明显的太阳活动周依赖性。此外，Song 等人 (2022) 比较了行星际日冕物质抛射与太阳风中的氦丰度，并得出结论：行星际日冕物质抛射和慢太阳风都具有太阳活动周依赖性，而快太阳风则没有这种依赖性。

由于行星际日冕物质抛射和慢太阳风都可能源自活动区和宁静太阳区，并且在太阳活动极大期，太阳大气中出现更多活动区，因此很自然地，在极大期附近于1天文单位处探测到的行星际日冕物质抛射和慢太阳风中，源自活动区的比例会更高（例如，Fu etal. 2017）。如果来自活动区和宁静太阳区的行星际日冕物质抛射之间存在明显的成分差异，那么就可以通过其源区合理地解释日冕物质抛射成分的太阳活动周依赖性。因此，有必要比较来自活动区和宁静太阳区的行星际日冕物质抛射成分。这是我们开展本研究的主要动机。本文结构如下：第2节介绍本研究使用的仪器；第3节展示观测结果，最后一节进行总结和讨论。

2. 仪器

本研究使用的行星际日冕物质抛射原位成分数据由太阳风离子成分谱仪（SWICS；Gloeckler 等，1998年）提供。该仪器搭载于先进成分探测器（ACE）上，位于太阳与地球之间的拉格朗日L1点。SWICS 对每个太阳风离子进行静电筛选、飞行时间分析和总能量测量。通过这三种测量方式的结合，SWICS 能够测定能荷比范围为 0.49–60 keV e^{-1}的氦、碳、氮、氧、氖、镁、硅、硫和铁太阳风离子的质量、电荷和能量。本文使用的 SWICS 数据采用改进算法进行了重新标定（Shearer 等，2014年），该算法能够更准确地分辨离子种类，并给出不确定度小于 25% 的电荷态分布。离子电荷态和元素丰度的时间分辨率分别为 1 小时和 2 小时。

通过太阳和日光层探测器上的大视场和光谱日冕仪（LASCO；Brueckner等，1995年）以及极紫外成像望远镜（EIT；Delaboudini`ere等，1995年对相应的日冕物质抛射及其源区进行研究。相关耀斑的软X射线（1–8 ˚A）通量数据来自地球静止轨道环境业务卫星（GOES），该卫星提供整个太阳圆面的积分X射线辐射。

3. 观测与结果 3.1. 行星际日冕物质抛射及其分类

本研究使用ACE科学中心的在线ICME目录[1] (Richardson和Cane（2010）)，因为该目录基于ACE测量数据。可用的最佳SWICS数据涵盖1998年2月至2011年8月，期间目录共收录了319个行星际日冕物质抛射。对于部分行星际日冕物质抛射，该目录还提供其在太阳附近对应的日冕物质抛射信息，即建立L1点的行星际日冕物质抛射与太阳附近相应日冕物质抛射之间的联系。共有146个行星际日冕物质抛射拥有LASCO观测到的日冕物质抛射对应信息。

利用LASCO日冕物质抛射在线目录（Gopalswamy等（2009）），我们首先检查LASCO和EIT的动画，并根据时间和空间相关性，尝试手动找出每次日冕物质抛射的源区。随后根据源区将行星际日冕物质抛射分为三组。在146个具有日冕物质抛射信息的行星际日冕物质抛射中，我们最终找到了96个案例的源区，其中82个起源于活动区（第I组），11个起源于宁静太阳区（第II组），3个起源于中间区（第III组）。第III组表示日冕物质抛射的源区同时覆盖活动区和宁静太阳区。为了使统计结果充分体现来自活动区和宁静太阳区的行星际日冕物质抛射之间的差异，本调查研究未纳入第III组的3个行星际日冕物质抛射。同时，我们还检查了GOES软X射线通量，并根据GOES耀斑列表[2]找到了与72个活动区日冕物质抛射相关联的耀斑。

表1列出了96个已确定源区的行星际日冕物质抛射的相关信息。第一列为事件编号。第2至第4列分别显示扰动时间（通常与行星际日冕物质抛射激波抵达地球的时间有关），以及根据等离子体和磁场观测确定的行星际日冕物质抛射开始和结束时间。第5列为相关日冕物质抛射首次出现在LASCO视场中的时间。接下来两列显示日冕物质抛射群组和美国国家海洋和大气管理局活动区编号，最后一列显示与该日冕物质抛射相关的耀斑等级。活动区编号取自Solar Monitor网站[3]，，耀斑信息则来自GOES耀斑列表。

表1. 已确定源区的96个行星际日冕物质抛射（日冕物质抛射）的相关信息。请注意，所用时间均为世界时。

No.	扰动开始	ICME开始	ICME结束	LASCO中的CME	群组	活动区编号	耀斑等级
1	1998年5月1日21:56	5月2日05:00	5月4日02:00	1998年4月29日16:58	I	08210	M 6.8
2	1998年11月7日08:15	11月7日 22:00	11月9日 01:00	1998年11月4日07:54	I	08375	碳 1.6
3	1998年11月8日04:51	11月9日 01:00	11月11日 01:00	1998年11月5日 20:44	I	08375	M 8.4
4	1998年11月13日 01:43	11月13日 02:00	11月14日 12:00	1998年11月9日 18:18	I	08378	...
5	1999年4月16日 11:25	4月16日 18:00	4月17日 19:00	1999年4月13日 03:30	II	...	...
6	1999年6月26日 20:16	6月27日 22:00	6月29日 04:00	1999年6月24日 13:31	I	08595	C 4.1
7	1999年7月6日 15:09	7月6日 21:00	7月7日 02:00	1999年7月3日19:54	I	08610	...
8	1999年7月26日23:33	7月27日17:00	7月29日12:00	1999年7月23日21:30	I	08636	...
9	1999年7月31日18:37	7月31日19:00	8月2日06:00	1999年7月28日09:06	I	08649	M 2.3
10	1999年8月11日23:00	8月12日03:00	8月14日00:00	1999年8月9日03:26	I	08657	碳 4.3
11	1999年8月20日23:00	8月20日23:00	8月23日11:00	1999年8月17日13:31	III	...	...
12	1999年9月22日 12:22	9月22日 19:00	9月24日 03:00	1999年9月20日 06:06	II	...	...
13	1999年10月21日 02:25	10月21日 08:00	10月22日 07:00	1999年10月18日 00:06	II	...	...
14	2000年6月22日 00:23	6月22日 17:00	6月23日 02:00	2000年6月18日 17:54	I	08831	M 3.9
15	2000年2月11日 02:58	2月11日 16:00	2月11日 20:00	2000年2月8日 09:30	I	08858	M 1.3
16	2000年2月11日 23:52	2月12日 12:00	2月13日 00:00	2000年2月10日 02:30	I	08858	碳 7.3
17	2000年2月14日 07:31	2月14日 12:00	2月16日 08:00	2000年2月12日 04:31	I	08858	M 1.7

表 **1** *continued*

[1] http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html[2] https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solarflares/x-rays/goes/xrs/[3] www.solarmonitor.org

表 **1** *(continued)*

No.	扰动开始	ICME开始	ICME结束	LASCO中的CME	群组	活动区编号	耀斑等级
18	2000年2月20日21:39	2月21日05:00	2月22日12:00	2000年2月17日20:06	I	08872	M 2.5
19	2000年4月6日16:39	4月7日06:00	4月8日06:00	2000年4月4日16:32	I	08933	C 9.7
20	2000年6月4日15:02	6月4日22:00	6月6日22:00	2000年5月31日08:06	II	...	...
21	2000年6月8日 09:10	6月8日 12:00	6月10日 17:00	2000年6月6日 15:54	I	09026	X 2.3
22	2000年7月15日 14:37	7月15日 19:00	7月17日 08:00	2000年7月14日 10:54	I	09077	X 5.7
23	2000年7月26日18:57	7月27日 02:00	7月28日02:00	2000年7月23日05:30	III	...	...
24	2000年7月28日06:34	7月28日12:00	7月30日13:00	2000年7月25日03:30	I	09097	震级 8.0
25	2000年8月11日18:45	8月12日 05:00	8月13日 22:00	2000年8月9日 16:30	I	09114	C 2.3
26	2000年9月8日 12:00	9月8日 12:00	9月10日 10:00	2000年9月5日 05:54	I	09152	...
27	2000年10月5日 03:26	10月5日 13:00	10月7日 11:00	2000年10月2日 20:26	I	09176	...
28	2000年10月28日 09:54	10月28日 21:00	10月29日 22:00	2000年10月25日 08:26	I	09199	...
29	2000年12月22日 19:25	12月23日 00:00	12月23日 12:00	2000年12月18日 11:50	I	09269	碳 7.0
30	2001年3月3日 11:21	3月4日 04:00	3月5日 02:00	2001年2月28日 14:50	I	09364	...
31	2001年3月27日 17:47	3月28日 17:00	3月30日18:00	2001年3月25日17:06	I	09402	C 9.0
32	2001年3月31日00:52	3月31日05:00	3月31日22:00	2001年3月28日12:50	I	09397	...
33	2001年3月31日22:00	4月1日04:00	4月3日15:00	2001年3月29日10:26	I	09393	X 1.7
34	2001年4月4日14:55	4月4日18:00	4月5日12:00	2001年4月2日22:06	I	09393	X 20.0
35	2001年4月8日11:01	4月8日14:00	4月9日04:00	2001年4月6日19:30	I	09415	X 5.6
36	2001年4月11日13:43	4月11日22:00	4月13日07:00	2001年4月10日05:30	I	09415	X 2.3
37	2001年4月13日07:34	4月13日09:00	4月14日12:00	2001年4月11日13:31	I	09415	M 2.3
38	2001年4月28日 05:01	4月28日 14:00	5月1日 02:00	2001年4月26日 12:30	I	09433	M 7.8
39	2001年9月30日 19:24	10月1日 08:00	10月2日 00:00	2001年9月28日 08:54	I	09636	M 3.3
40	2001年10月1日21:15	10月2日04:00	10月2日12:00	2001年9月29日11:54	I	09636	震级1.8
41	2001年10月11日17:01	10月12日04:00	10月12日09:00	2001年10月9日11:30	I	09653	震级1.4
42	2001年10月21日16:48	10月21日20:00	10月25日10:00	2001年10月19日16:50	I	09661	X 1.6
43	2001年10月26日22:00	10月27日03:00	10月28日12:00	2001年10月22日18:26	I	09672	X 1.2
44	2001年10月28日03:19	10月29日 22:00	10月31日 13:00	2001年10月25日 15:26	I	09672	X 1.3
45	2001年11月19日 18:15	11月19日 22:00	11月21日 13:00	2001年11月17日 05:30	III	...	...
46	2001年11月24日 06:56	11月24日 14:00	11月25日 20:00	2001年11月22日 23:30	I	09704	M 9.9
47	2002年3月18日 13:22	3月19日 05:00	3月20日 16:00	2002年3月15日 23:06	I	09866	M 2.2
48	2002年4月17日11:07	4月17日16:00	4月19日15:00	2002年4月15日03:50	I	09906	M 1.2
49	2002年4月19日08:35	4月20日00:00	4月21日18:00	2002年4月17日08:26	I	09906	M 2.6
50	2002年5月11日10:14	5月11日15:00	5月12日00:00	2002年5月8日13:50	I	09934	C 4.2
51	2002年5月20日03:40	5月20日10:00	5月21日22:00	2002年5月16日 00:50	I	09948	碳 4.5
52	2002年5月23日 10:50	5月23日 20:00	5月25日 18:00	2002年5月22日 03:26	II	...	...
53	2002年7月17日 16:03	7月18日 12:00	7月19日 09:00	2002年7月15日 20:30	I	10030	X 3.0
54	2002年8月18日 18:46	8月19日 12:00	8月21日 14:00	2002年8月16日 12:30	I	10069	M 5.2
55	2002年9月7日16:36	9月8日04:00	9月8日20:00	2002年9月5日16:54	I	10102	C 5.2
56	2002年9月19日06:00	9月19日20:00	9月20日21:00	2002年9月17日08:06	I	10114	C 8.6
57	2003年2月1日13:05	2月1日19:00	2月3日07:00	2003年6月30日10:06	II	...	...
58	2003年6月16日18:00	6月17日10:00	6月18日08:00	2003年6月14日01:54	II	...	...

表 **1** *continued*

表 **1** *(continued)*

No.	扰动开始	ICME开始	ICME结束	LASCO中的CME	群组	活动区编号	耀斑等级
59	2003年10月24日15:24	10月24日21:00	10月25日12:00	2003年10月22日08:30	I	10484	...
60	2003年10月28日 02:06	10月28日 02:30	10月28日 09:00	2003年10月26日 17:54	I	10484	X 1.2
61	2003年10月29日 06:11	10月29日 11:00	10月30日 03:00	2003年10月28日 11:30	I	10486	X 17.2
62	2003年10月30日16:19	10月31日02:00	11月02日00:00	2003年10月29日20:54	I	10486	X 10.0
63	2003年11月20日08:03	11月20日10:00	11月21日08:00	2003年11月18日08:50	I	10501	M 3.9
64	2004年6月22日 01:37	6月22日 08:00	6月23日 17:00	2004年6月20日 00:06	I	10540	...
65	2004年6月23日 14:25	6月23日 23:00	6月25日 04:00	2004年6月21日 04:54	II	...	...
66	2004年7月22日10:36	7月22日18:00	7月24日08:00	2004年7月20日13:31	I	10652	M 8.6
67	2004年7月24日06:13	7月24日14:00	7月25日15:00	2004年7月22日07:31	I	10652	C 2.0
68	2004年7月25日15:00	7月25日 20:00	7月26日 22:00	2004年7月23日 16:06	I	10652	碳 1.0
69	2004年7月26日 22:49	7月27日 02:00	7月27日 22:00	2004年7月25日 14:54	I	10652	M 2.2
70	2004年11月7日 18:27	11月7日 22:00	11月9日 10:00	2004年11月4日 23:30	I	10696	M 5.4级
71	2004年11月9日 18:25	11月9日 20:00	11月11日 23:00	2004年11月7日 16:54	I	10696	X 2.0级
72	2004年11月11日 17:10	11月12日 08:00	11月13日 23:00	2004年11月10日 02:26	I	10696	X 2.5
73	2004年12月11日 13:40	12月12日 22:00	12月13日 19:00	2004年12月8日 20:26	I	10709	碳 2.5
74	2005年6月8日 17:00	6月8日 21:00	6月9日 18:00	2005年6月5日 15:30	II	...	...
75	2005年6月16日11:00	6月16日14:00	6月17日07:00	2005年6月13日17:54	I	10718	C 4.2
76	2005年6月18日21:00	6月18日23:00	6月20日03:00	2005年6月17日09:30	I	10720	X 3.8
77	2005年6月21日 17:11	6月21日 19:00	6月22日 17:00	2005年6月20日 06:54	I	10720	X 7.1
78	2005年2月20日 12:00	2月20日 12:00	2月22日 07:00	2005年2月17日 00:06	I	10734	碳 4.9
79	2005年5月15日 02:38	5月15日 06:00	5月19日 00:00	2005年5月13日 17:12	I	10759	震级 8.0
80	2005年5月20日 03:00	5月20日 03:00	5月22日 02:00	2005年5月16日 13:50	I	10759	碳 1.2
81	2005年7月10日 03:37	7月10日 10:00	7月12日 04:00	2005年7月7日 17:06	I	10786	M 4.9级
82	2005年8月9日 00:00	8月9日 00:00	8月9日 19:00	2005年8月5日 08:54	I	10792	C 2.6级
83	2005年8月24日 06:13	8月24日14:00	8月24日23:00	2005年8月22日01:31	I	10798	M 2.6
84	2005年9月2日14:19	9月2日18:00	9月3日04:00	2005年8月31日11:30	I	10803	C 2.0
85	2006年7月9日21:36	7月10日21:00	7月11日19:00	2006年7月6日08:54	I	10898	M 2.5
86	2006年8月19日 11:31	8月20日 13:00	8月21日 16:00	2006年8月16日 16:30	I	10904	C 3.6级
87	2006年12月14日14:14	12月14日22:00	12月15日13:00	2006年12月13日02:54	I	10930	X 3.4
88	2006年12月16日17:55	12月17日00:00	12月17日17:00	2006年12月14日22:30	I	10930	X 1.5
89	2008年12月16日11:59	12月17日03:00	12月17日14:00	2008年12月12日08:54	II	...	...
90	2010年2月11日00:00	2月11日08:00	2月12日03:00	2010年2月7日03:54	I	11045	M 6.4
91	2010年4月5日08:26	4月5日12:00	4月6日14:00	2010年4月3日10:33	I	11059	B 7.4
92	2010年4月11日 13:04	4月12日 01:00	4月12日 15:00	2010年4月08日 04:54	I	11060	B 1.5
93	2010年5月28日 02:58	5月28日 19:00	5月29日 17:00	2010年5月24日 14:06	II	...	...
94	2011年2月18日 01:30	2月18日 19:00	2月20日 08:00	2011年2月15日 02:36	I	11158	X 2.2
95	2011年8月4日 21:53	8月5日 05:00	8月5日 14:00	2011年8月2日 06:36	I	11261	震级1.4
96	2011年8月5日 17:51	8月6日 22:00	8月7日 22:00	2011年8月4日 04:12	I	11261	M 9.3

3.2. 来自不同区域的行星际日冕物质抛射对比

图1展示了来自活动区（红色）和宁静太阳区（蓝色）的行星际日冕物质抛射的离子电荷态直方图。从面板(a)到(f), 分别为 $< Q_{Mg} >$、$< Q_{Fe} >$、 $< Q_{Si} >$、C^{6+}/C^{4+}、C^{6+}/C^{5+}和O^{7+}/O^{6+}依次显示。根据所有相应的数据点，我们计算出各参数的平均值。对于来自活跃区的行星际日冕物质抛射，这些平均值依次为 9.424（9.277）、12.510（11.531）、10.279（10.006）、9.630（5.401）、2.055（1.302）和 0.956（0.606）。

动区（宁静太阳区）的行星际日冕物质抛射，这些平均值依次为9.424（9.277）、12.510（11.531）、10.279（10.006）、9.630（5.401）、2.055（1.302）和0.956（0.606）。这些数值也用箭头标注在各面板中。总体而言，与来自宁静太阳区的行星际日冕物质抛射相比，来自活动区的行星际日冕物质抛射具有更高的所有离子电荷态。这与预期一致，因为活动区日冕物质抛射的磁重联区温度更高。

两组行星际日冕物质抛射的金属元素（$< Q_{Mg} >$、$< Q_{Fe} >$ 和 $< Q_{Si} >$）电荷态直方图明显不同。活动区日冕物质抛射包含更高的电荷态。例如，活动区日冕物质抛射中有一部分铁离子的电荷态高于 16+，而宁静区日冕物质抛射则完全没有这种情况。对于非金属元素，活动区日冕物质抛射中的 C^{6+}/C^{4+}、C^{6+}/C^{5+} 和 O^{7+}/O^{6+} 平均值，分别比宁静太阳区高出 78.3%、57.8% 和 57.8%。

图2显示了来自活动区（红色）和宁静太阳区（蓝色）的行星际日冕物质抛射的相对元素丰度直方图。六个面板依次展示 Mg/O、Fe/O、Si/O、C/O、Ne/O 和 He/O，并在各面板中标出相应的平均值。显然，活动区日冕物质抛射的元素丰度中有相当一部分较高，其各参数的平均值分别比宁静区日冕物质抛射高出 59.8%（从 0.184 增至 0.294）、61.1%（从 0.185 增至 0.298）、44.1%（从 0.179 增至 0.258）、10.5%（从 0.486 增至 0.537）、56.9%（从 0.167 增至 0.262）和 71.7%（从 78.418 增至 134.677 ）。请注意，尽管存在显著差异，活动区与宁静区行星际日冕物质抛射的成分直方图仍有很大程度的重叠。

3.3. 不同耀斑等级的行星际日冕物质抛射比较

对不同区域产生的行星际日冕物质抛射进行比较后可以清楚地发现，活动区日冕物质抛射具有较高的离子电荷态和更丰富的元素丰度，这应与磁重联区的高温以及活动区的磁结构有关。为进一步验证这一推测，我们考察了行星际日冕物质抛射成分与耀斑等级之间的相关性。如前所述，我们确定了 72 个活动区日冕物质抛射的关联耀斑，其中 21 个事件与 C级耀斑相关，29 个与 M级耀斑相关，20 个与 X级耀斑相关；另有 2 个行星际日冕物质抛射与 B级耀斑相关，但由于数量有限，此处不予考虑。

图3展示了与C级（蓝色）、M级（橙色）和X级（红色）耀斑相关的行星际日冕物质抛射的 $< Q_{Mg} >$,$< Q_{Fe} >$, $< Q_{Si} >$、C^{6+}/C^{4+}、C^{6+}/C^{5+} 和O^{7+}/O^{6+}直方图。每个面板中的箭头和数字表示相应的均值。为展示弱耀斑与强耀斑对应的行星际日冕物质抛射之间的差异，我们重点关注C级和X级耀斑的数值。C级耀斑的平均值分别为9.323、11.951、10.062、8.217、1.832和0.679，而X级耀斑对应的平均值分别为9.570、13.296、10.557、11.988、2.322和1.319。显然，与X级耀斑相关的行星际日冕物质抛射的离子电荷态高于与C级耀斑相关的行星际日冕物质抛射，这与我们的预期相符。

图 4 展示了与 C级（蓝色）、M级（橙色）和 X级（红色）耀斑相关的行星际日冕物质抛射的镁/氧、铁/氧、硅/氧、碳/氧、氖/氧和氦氧比直方图。箭头和数字表示各面板中对应的均值。与 C级（X级）耀斑相关的各参数平均值依次为 0.255（0.336）、0.245（0.320）、0.236（0.276）、0.534（0.536）、0.199（0.388）和 122.649（147.362）。同样可以清楚地看出，与 X级耀斑相关的行星际日冕物质抛射具有比与 C级耀斑相关的事件更高的元素丰度。图 3 和图 4 中的统计结果表明，与更强耀斑相关的行星际日冕物质抛射具有更高的离子电荷态和更丰富的元素丰度。由于 M级和 X级耀斑都属于强耀斑，其成分直方图较为相似。

此外，我们使用 Python 例程 $stats.ttest_ind$ 进行 t 检验，以考察两组的平均值是否存在显著差异。该函数执行独立样本t检验，并输出 p值和检验统计量。p值的范围为 0.0 至 1.0，较小的值（通常小于 0.05 或 0.01）表明两组的平均值确实存在差异。我们对图 1–4 中的所有成分参数进行 t 检验，即比较来自活动区和宁静太阳区的行星际日冕物质抛射，以及与 C 级和 X级耀斑相关的行星际日冕物质抛射。结果显示，几乎所有 p 值都小于 0.01，只有与 C 级和 X 级耀斑相关的行星际日冕物质抛射的碳/氧比值例外，其 p值为 0.928。这说明，在 99% 的置信水平下，大多数成分参数的平均值存在显著差异。

4. 总结与讨论

基于 ACE 科学中心提供的 ICME目录（Richardson 和Cane（2010））以及 CDAW 的日冕物质抛射目录（Gopalswamy等（2009）），我们手动确定了1998年到2011年间96个行星际日冕物质抛射的源区，其中82个来自活动区，11个来自宁静太阳区，另有3个来自中间区域

。活动区与宁静太阳区行星际日冕物质抛射的成分比较表明，与来自宁静太阳区的事件相比，来自活动区的事件具有较高的离子电荷态和较丰富的元素丰度。在82个活动区行星际日冕物质抛射中，我们为其中72个找到了对应的耀斑，包括21个与C级耀斑相关的事件、29个与M级耀斑相关的事件和20个与X级耀斑相关的事件，另有2个事件与B级耀斑相关。对不同耀斑等级相关的行星际日冕物质抛射进行比较发现，与C级耀斑相关的事件相比，与X级耀斑相关的事件具有更高的电荷态和元素丰度（碳/氧除外）。

我们的综述研究支持这样一种观点：行星际日冕物质抛射中的高电荷态主要源于太阳爆发期间磁重联区的高温度（Lepri 和 Zurbuchen 2004；Song 等人 2016），这也符合流行的日冕物质抛射模型的预期（Mikic & Linker 1994；Antiochos 等人 1999；Lin & Forbes 2000；Moore 等人 2001；T¨or¨ok 等人 2004；Kliem & T¨or¨ok 2006；Chen 2008）。我们的研究还支持，行星际日冕物质抛射中的元素丰度取决于源区的磁结构以及相关耀斑的X射线特征；二者分别主要与第一电离势效应（Laming 2004, 2015）和光电离（Shemi 1991；Schmelz 1993）有关。更多讨论见 Song 等人（2021）和 Song 等人（2022）。

正如前人研究所指出的，行星际日冕物质抛射的成分（Gu 等人 2020；Song 等人 2021，2022）以及慢太阳风（Aellig 等人 2001；Kasper 等人 2007，2012；McIntosh 等人 2011；Lepri 等人 2013；Alterman & Kasper 2019；Alterman 等人 2021）具有明显的太阳活动周依赖性。太阳活动周以太阳黑子数为良好的表征，而活动区的数量从太阳活动极小期到极大期逐渐增加。因此，太阳活动极大期前后活动区发生更多日冕物质抛射是很自然的，这导致在1天文单位附近探测到的行星际日冕物质抛射中，源自活动区且与较强耀斑相关的比例更高。这或许可以解释为何在1天文单位附近测得的日冕物质抛射成分表现出太阳活动周依赖性（Song 等人 2021，2022）。

慢太阳风的情况也类似，它可以来自活动区和宁静太阳区（例如，Zhao 等人 2017a）。在太阳活动极大期（极小期）附近，来自活动区（宁静太阳区）的慢太阳风比例更高（例如，Fu 等人 2017），因此在 1天文单位附近测得的慢太阳风成分也表现出太阳活动周依赖性（Lepri 等人 2013；Song 等人 2022）。相比之下，快太阳风始终起源于日冕洞，因此其成分（例如氦丰度）在 1天文单位附近的测量值，其变化并不像慢太阳风那样明显（Alterman &Kasper 2019；Alterman 等人 2021；Song 等人 2022），行星际日冕物质抛射也是如此（Song 等人 2022），且在太阳活动周期间均是如此。

第一电离势效应是慢太阳风和行星际日冕物质抛射的一项主要元素丰度特征，而引力沉降（Raymond 等人 1997、1998年；Lenz 等人 1998年；Raymond 1999）会改变慢太阳风（Weberg 等人 2012）和行星际日冕物质抛射（Rivera 等人 2022）中第一电离势效应的特征。Rivera 等人（2022）报告称，1998年至2011年间的行星际日冕物质抛射中，有 ∼33%的时段表现出一些引力沉降效应。他们还发现，这种效应在太阳活动极小期最为显著。引力沉降会导致日冕中的元素按质量成比例地耗减，并使铁/氧等相对丰度降低。这也可能是部分重元素相对丰度具有太阳活动周依赖性的原因之一（Song 等人 2021）。

图2中镁/氧、铁/氧和硅/氧的直方图支持活动区存在强烈第一电离势增强这一观点，而氖/氧和氦氧比的分布则不支持这一观点，因为氖（21.56 eV）和氦（24.58 eV）的第一电离势高于氧（13.61 eV）。Song 等人(2021) 提出，活动区日冕物质抛射中氖/氧比升高可能是耀斑光电离效应所致（Shemi 1991；Schmelz 1993）。耀斑前软X射线可在色球底部形成一个非热电离比的板状区域（Shemi 1991）。由于氖和氧的光电离截面比为9:4（Yeh & Lindau（1985）），且光电离氧可通过与中性氢发生电荷转移反应而复合，氖离子便与板状区域中的中性氧混合，并与热电离低第一电离势元素一同被选择性地优先输运至太阳日冕和行星际日冕物质抛射中（Song 等人 2021）。

此外，慢太阳风（Zhao 等人 2017b；Raymond 等人 2022）和行星际日冕物质抛射（Kocher 等人 2017）中都存在裸离子异常，其中 C^{6+} 及其他完全剥离离子的丰度异常偏低，这类现象被称为异常太阳风或异常ICME。Rivera 等人（2021）报告称，异常ICME中的氖/氧有所增强，这也可能导致来自活动区的行星际日冕物质抛射具有较高的氖/氧。异常事件的数量与太阳活动周呈正相关，因此这可能是导致某些元素相对丰度具有太阳活动周依赖性的另一个因素（Song 等人 2021）。

然而，光电离效应和异常值都无法解释活动区日冕物质抛射中较高的氦氧比，因为氧的光电离截面大于氦（Yeh 和 Lindau（1985）），而异常ICME中异常低的氦$^{2+}$

密度会降低氦氧比（未显示）。由于氧的质量大于氦，或许可以采用引力沉降来解释活动区中较高的氦氧比。还需要开展更多研究来明确这一推测。

致谢

我们感谢审稿人（John Raymond博士）提出的宝贵意见和建议。Hongqiang Song感谢Xin Cheng博士和Bo Li博士的讨论。我们感谢使用ACE科学中心的ICME目录（Richardson与Cane（2010））以及CDAW的CME目录（Gopalswamy等（2009））。所有SWICS数据均从ACE科学中心下载。本研究得到国家自然科学基金委员会项目U2031109、11973031、12073042以及国家重点研发计划项目2022YFF0503003（2022YFF0503000）的资助。Hongqiang Song还得到中国科学院项目XDA-17040507的资助。

参考文献

Aellig, M. R., Lazarus, A. J., & Steinberg, J. T. 2001, 《地球物理研究快报》, 28, 2767, doi: 10.1029/2000GL012771Alterman, B. L., & Kasper, J. C. 2019, 《天体物理学杂志快报》, 879, L6, doi: 10.3847/2041-8213/ab2391Alterman, B. L., Kasper, J. C., Leamon, R. J., &McIntosh, S. W. 2021, 《太阳物理学》, 296, 67, doi: 10.1007/s11207-021-01801-9Antiochos, S. K., DeVore, C. R., & Klimchuk, J. A. 1999, 《天体物理学杂志》, 510, 485, doi: 10.1086/306563Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., 等. 1995, 《太阳物理学》, 162, 357, doi: 10.1007/BF00733434Chen, P. F. 2008, 《天体物理学与天文学杂志》, 29, 179, doi: 10.1007/s12036-008-0023-0—. 2011, 《太阳物理学综述》, 8, 1, doi: 10.12942/lrsp-2011-1Cheng, X., Zhang, J., Liu, Y., & Ding, M. D. 2011, 《天体物理学杂志快报》, 732, L25, doi: 10.1088/2041-8205/732/2/L25Delaboudini`ere, J. P., Artzner, G. E., Brunaud, J., 等. 1995, 《太阳物理学》, 162, 291, doi: 10.1007/BF00733432Forbes, T. G. 2000, 《地球物理研究杂志》, 105, 23153, doi: 10.1029/2000JA000005Forbes, T. G., Linker, J. A., Chen, J., 等. 2006, 《空间科学评论》, 123, 251, doi: 10.1007/s11214-006-9019-8Fu, H., Madjarska, M. S., Xia, L., 等. 2017, 《天体物理学杂志》, 836, 169, doi: 10.3847/1538-4357/aa5cba Gloeckler, G., Cain, J., Ipavich, F. M., 等. 1998年, 《空间科学评论》, 86, 497, doi: 10.1023/A:1005036131689Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., 等. 2009年, Earth Moon and Planets, 104, 295, doi: 10.1007/s11038-008-9282-7Gosling, J. T., McComas, D. J., Phillips, J. L., & Bame, S. J. 1991年, 《地球物理研究杂志》, 96, 7831, doi: 10.1029/91JA00316Gu, C., Yao, S., & Dai, L.2020年, 《天体物理学杂志》, 900, 123, doi: 10.3847/1538-4357/aba7b8Huang, J., Liu, Y., Feng, H., 等. 2020年, 《天体物理学杂志》, 893, 136, doi: 10.3847/1538-4357/ab7a28Kasper, J. C., Stevens, M. L., Korreck,K. E., 等. 2012年, 《天体物理学杂志》, 745, 162, doi: 10.1088/0004-637X/745/2/162Kasper, J. C., Stevens, M. L., Lazarus, A. J., Steinberg, J. T., & Ogilvie, K. W. 2007年, 《天体物理学杂志》, 660, 901, doi: 10.1086/510842Kliem, B., & T¨or¨ok, T. 2006, PhRvL,96, 255002,doi: 10.1103/PhysRevLett.96.255002Kocher, M., Lepri, S. T., Landi, E., Zhao, L., & Manchester, W. B., I. 2017年, 《天体物理学杂志》, 834, 147, doi: 10.3847/1538-4357/834/2/147Laming, J. M. 2004年, 《天体物理学杂志》, 614, 1063, doi: 10.1086/423780—. 2009年, 《天体物理学杂志》, 695, 954, doi: 10.1088/0004-637X/695/2/954—. 2015年, 《太阳物理学综述》, 12, 2, doi: 10.1007/lrsp-2015-2

Landi, E., Gruesbeck, J. R., Lepri, S. T., Zurbuchen, T. H., & Fisk, L. A. 2012年, 《天体物理学杂志》, 761, 48, doi: 10.1088/0004-637X/761/1/48 Lenz, D. D., Lou, Y.-Q., & Rosner, R. 1998 年 , 《天体物理学杂志》 , 504, 1020, doi: 10.1086/306111 Lepri, S. T., Landi, E., & Zurbuchen, T. H. 2013年, 《天体物理学杂志》, 768, 94, doi: 10.1088/0004-637X/768/1/94 Lepri, S. T., & Rivera, Y. J. 2021年, 《天体物理学杂志》, 912, 51, doi: 10.3847/1538-4357/abea9f Lepri, S. T., & Zurbuchen, T. H. 2004年, 《地球物理研究杂志》（空间物理学）, 109, A01112, doi: 10.1029/2003JA009954 Lepri, S. T., Zurbuchen, T. H., Fisk, L. A., 等. 2001年, 《地球物理研究杂志》, 106, 29231, doi: 10.1029/2001JA000014 Lin, J., & Forbes, T. G. 2000年, 《地球物理研究杂志》, 105, 2375, doi: 10.1029/1999JA900477 Manchester, W., Kilpua, E. K. J., Liu, Y. D., 等. 2017年, 《空间科学评论》, 212, 1159, doi: 10.1007/s11214-017-0394-0 McIntosh, S. W., Kiefer, K. K., Leamon, R. J., Kasper, J. C., & Stevens, M. L. 2011年, 《天体物理学杂志快报》 , 740, L23, doi: 10.1088/2041-8205/740/1/L23 Mikic, Z., & Linker, J. A. 1994年, 《天体物理学杂志》, 430, 898, doi: 10.1086/174460 Moore, R. L., Sterling, A. C., Hudson, H. S., & Lemen, J. R. 2001年, 《天体物理学杂志》, 552, 833, doi: 10.1086/320559 Ouyang, Y., Yang, K., & Chen, P. F. 2015年, 《天体物理学杂志》, 815, 72, doi: 10.1088/0004-637X/815/1/72 Owens, M. J. 2018年, 《太阳物理学》, 293, 122, doi: 10.1007/s11207-018-1343-0 Owocki, S. P., Holzer, T. E., & Hundhausen, A. J. 1983年, 《天体物理学杂志》, 275, 354, doi: 10.1086/161538 Patsourakos, S., Vourlidas, A., & Stenborg, G. 2013年, 《天体物理学杂志》, 764, 125, doi: 10.1088/0004-637X/764/2/125 Raymond, J. C. 1999年, 《空间科学评论》, 87, 55, doi: 10.1023/A:1005157914229 Raymond, J. C., Asgari-Targhi, M., Wilson, M. L., 等. 2022年, 《天体物理学杂志》, 936, 175, doi: 10.3847/1538-4357/ac8976 Raymond, J. C., Kohl, J. L., Noci, G., 等. 1997年, 《太阳物理学》, 175, 645, doi: 10.1023/A:1004948423169 Raymond, J. C., Fineschi, S., Smith,P. L., 等. 1998年, 《天体物理学杂志》, 508, 410, doi: 10.1086/306391 Richardson, I. G., & Cane, H. V. 2010年, 《太阳物理学》, 264, 189, doi: 10.1007/s11207-010-9568-6 Rivera, Y. J., Lepri, S. T., Raymond, J. C., 等. 2021年, 《天体物理学杂志》, 921, 93, doi: 10.3847/1538-4357/ac1676 Rivera, Y. J., Raymond, J. C., Landi, E., 等. 2022年, 《天体物理学杂志》, 936, 83, doi: 10.3847/1538-4357/ac8873 Schmelz, J. T. 1993, 《天体物理学杂志》, 408, 373, doi: 10.1086/172594 Shearer, P., von Steiger, R., Raines, J. M., et al. 2014, 《天体物理学杂志》, 789, 60, doi: 10.1088/0004-637X/789/1/60 Shemi, A. 1991, 《皇家天文学会月报》, 251, 221, doi: 10.1093/mnras/251.2.221 Shi, M., Li, B., Van Doorsselaere, T., Chen, S.-X., & Huang, Z. 2019, 《天体物理学杂志》, 870, 99, doi: 10.3847/1538-4357/aaf393 Song, H., Cheng, X., Li, L., Zhang, J., & Chen, Y. 2022, 《天体物理学杂志》, 925, 137, doi: 10.3847/1538-4357/ac3bbf Song, H., Li, L., Sun, Y., et al. 2021, 《太阳物理学》, 296, 111, doi: 10.1007/s11207-021-01852-y Song, H., & Yao, S. 2020, 《中国科学：技术科学》, 63, 2171, doi: 10.1007/s11431-020-1680-y Song, H. Q., Chen, Y., Zhang, J., et al. 2015, 《天体物理学杂志快报》, 804, L38, doi: 10.1088/2041-8205/804/2/L38 Song, H. Q., Zhang, J., Chen, Y., & Cheng, X. 2014, 《天体物理学杂志快报》, 792, L40, doi: 10.1088/2041-8205/792/2/L40 Song, H. Q., Zhong, Z., Chen, Y., et al. 2016, ApJS, 224, 27, doi: 10.3847/0067-0049/224/2/27 Song, H. Q., Chen, Y., Li, B., et al. 2017, 《天体物理学杂志快报》, 836, L11, doi: 10.3847/2041-8213/aa5d54 T¨or¨ok, T., Kliem, B., & Titov, V. S. 2004, 《天文学与天体物理学》, 413, L27, doi: 10.1051/0004-6361:20031691 Wang, W., Liu, R., Wang, Y., et al. 2017, 《自然·通讯》, 8, 1330, doi: 10.1038/s41467-017-01207-x Webb, D. F., & Howard, T. A. 2012, 《太阳物理学综述》, 9, 3, doi: 10.12942/lrsp-2012-3 Weberg, M. J., Zurbuchen,T. H., & Lepri, S. T. 2012, 《天体物理学杂志》, 760, 30, doi: 10.1088/0004-637X/760/1/30 Xu, M., Shen, C., Wang, Y., Luo, B., & Chi, Y. 2019, 《天体物理学杂志快报》, 884, L30, doi: 10.3847/2041-8213/ab4717 Ye, J., Cai, Q., Shen, C., et al. 2021, 《天体物理学杂志》, 909, 45, doi: 10.3847/1538-4357/abdeb5 Yeh, J. J., & Lindau, I. 1985, 《原子数据与核数据表》, 32, 1, doi: 10.1016/0092-640X(85)90016-6 Zhang, J., Richardson, I. G., Webb, D. F., et al. 2007, 《地球物理研究杂志》（空间物理学）, 112, A10102, doi: 10.1029/2007JA012321 Zhao, L., Landi, E., Lepri, S. T., et al. 2017a, 《天体物理学杂志》, 846, 135, doi: 10.3847/1538-4357/aa850c —. 2017b, ApJS, 228, 4, doi: 10.3847/1538-4365/228/1/4 Zhao, L., Landi, E., Zurbuchen, T. H., Fisk, L. A., & Lepri, S. T. 2014, 《天体物理学杂志》, 793, 44, doi: 10.1088/0004-637X/793/1/44 Zurbuchen, T. H., Weberg, M., von Steiger, R., et al. 2016, 《天体物理学杂志》, 826, 10, doi: 10.3847/0004-637X/826/1/10

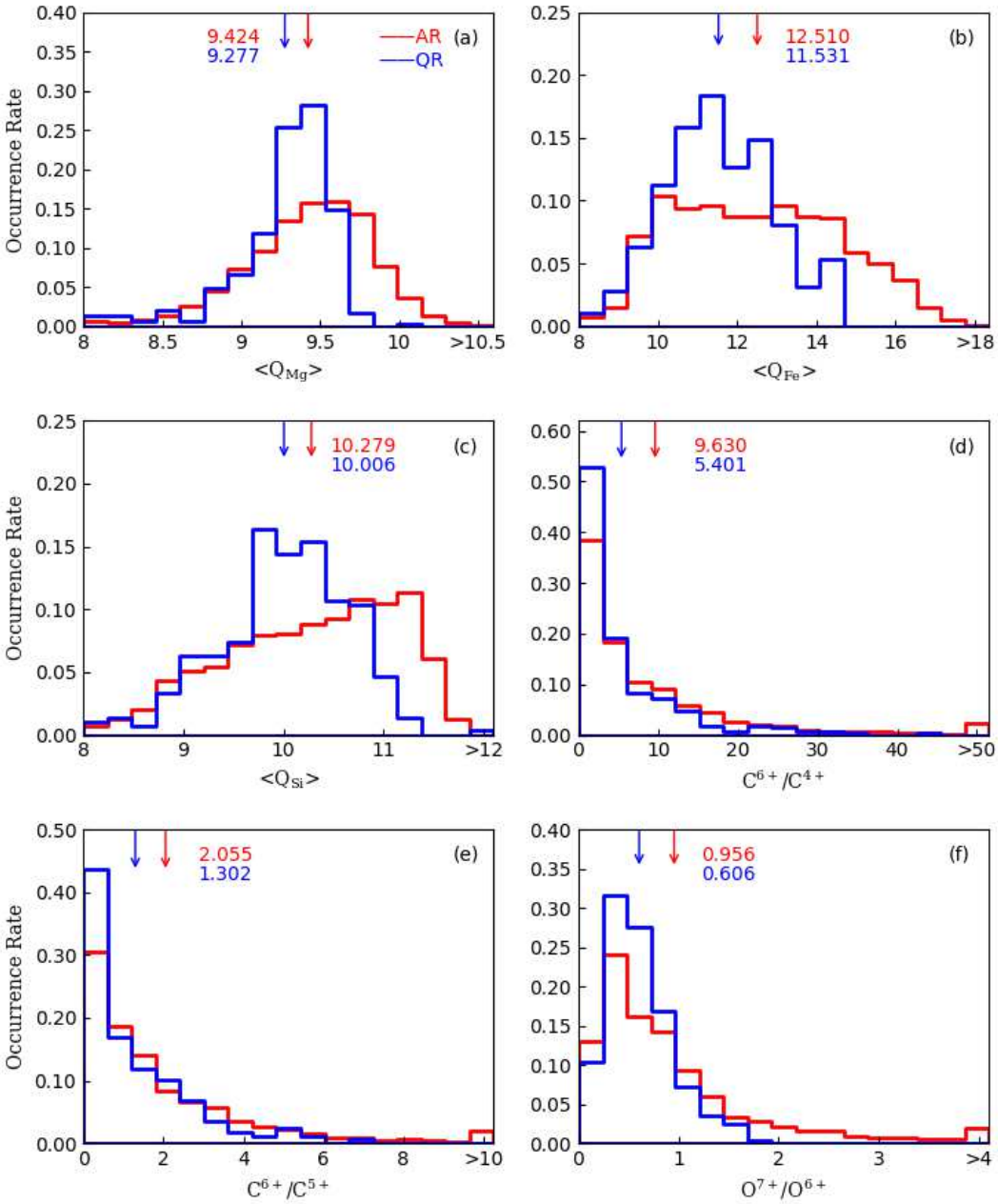


图1. 源自活动区（红色）和宁静太阳区（蓝色）的行星际日冕物质抛射中， $< Q_{Mg} >$ (a)、 $< Q_{Fe} >$ (b)、 $< Q_{Si} >$ (c)、C^{6+}/C^{4+} (d)、C^{6+}/C^{5+} (e) 和 O^{7+}/O^{6+} (f) 的直方图。各面板中的箭头和数字表示相应的平均值。

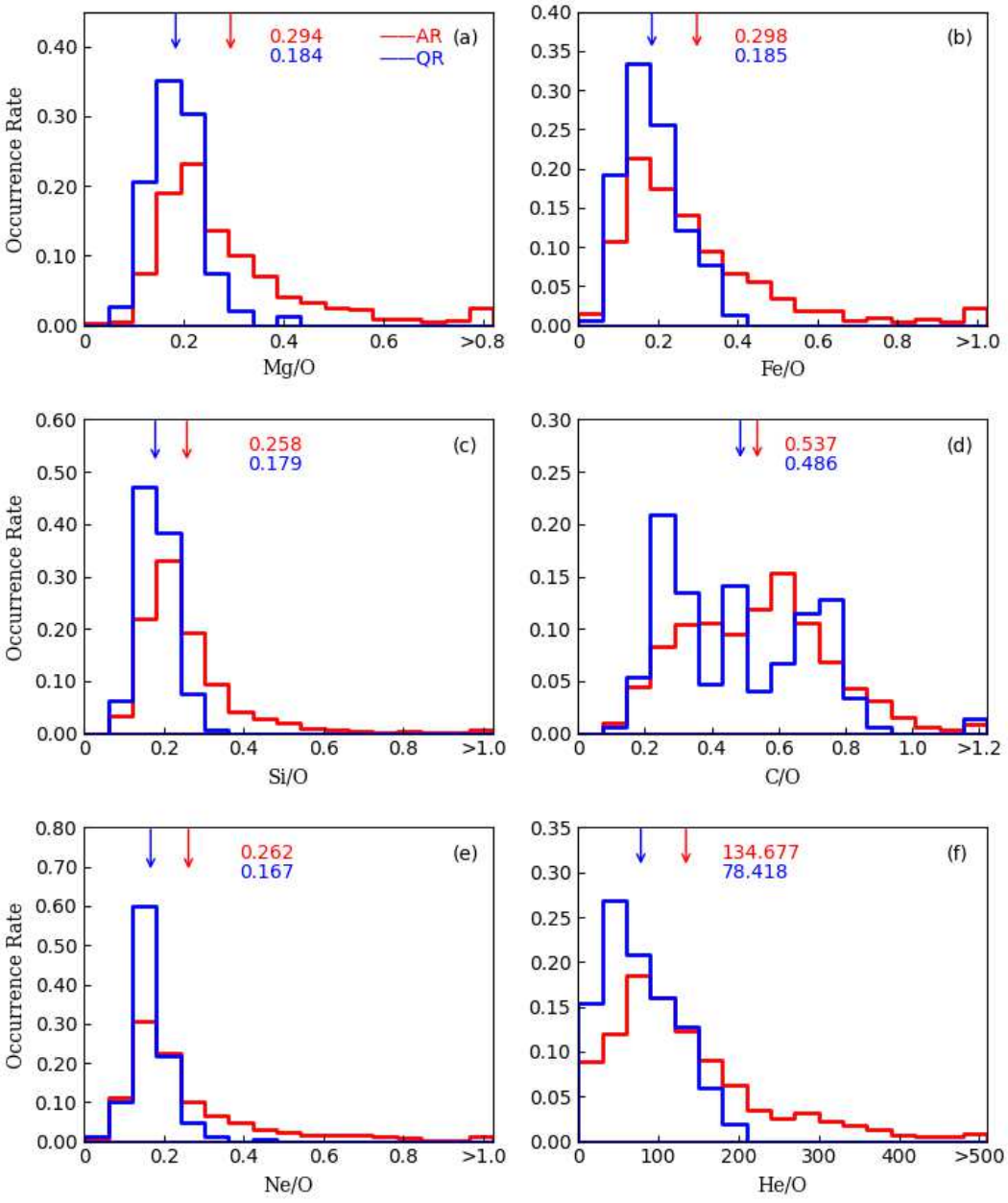


图2. 来自活动区（红色）和宁静太阳区（蓝色）的行星际日冕物质抛射中，镁/氧（a）、铁/氧（b）、硅/氧（c）、碳/氧（d）、氖/氧（e）和氦氧比（f）的直方图。每个面板中的箭头和数字表示相应的平均值。

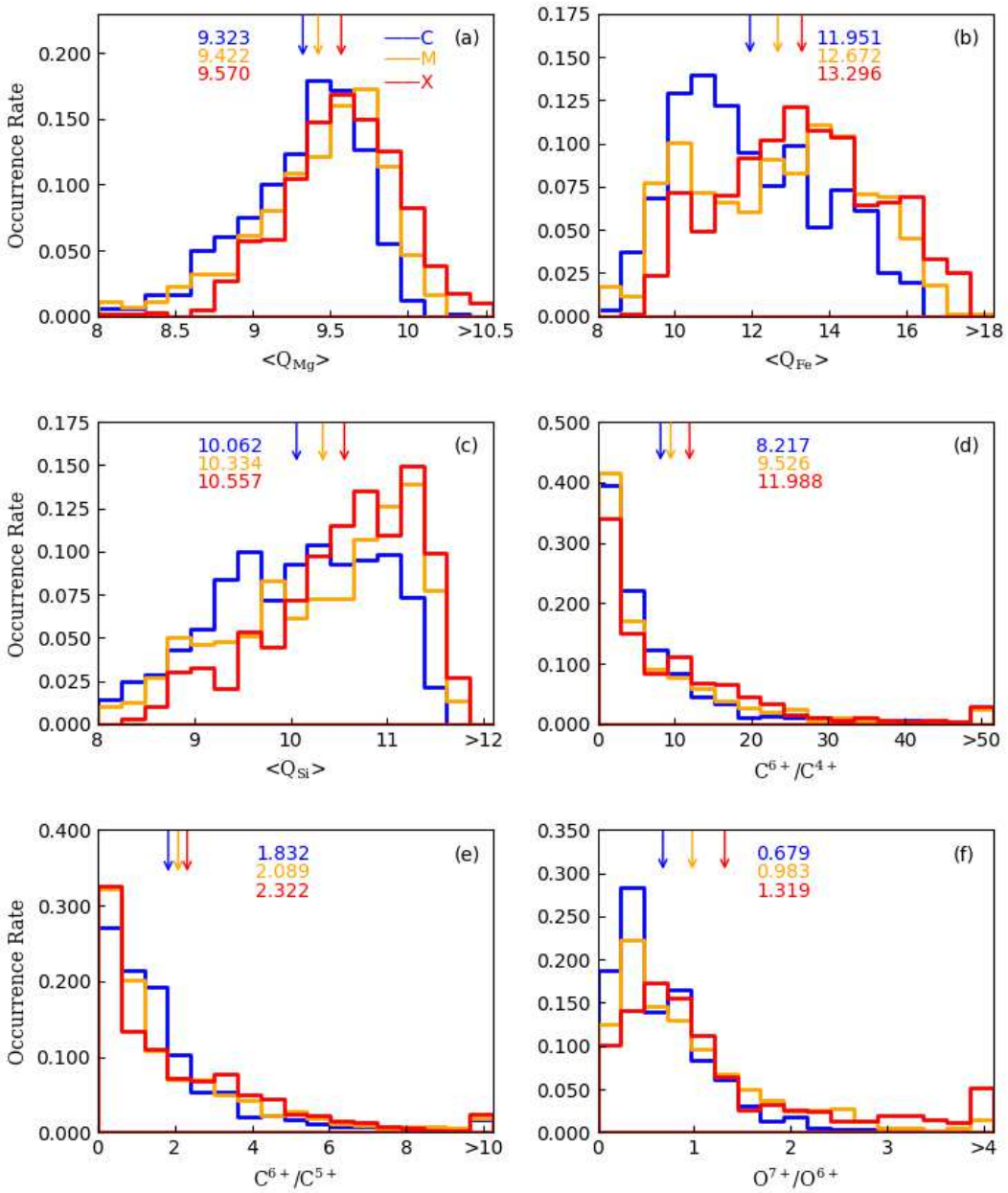


图 3. 与 C 级（蓝色）、M 级（橙色）和 X 级（红色）耀斑相关的行星际日冕物质抛射中，$< Q_{Mg} >$ (a)、$< Q_{Fe} >$ (b)、$< Q_{Si} >$ (c)、C^{6+}/C^{4+} (d)、C^{6+}/C^{5+} (e) 和 O^{7+}/O^{6+} (f) 的直方图。每个面板中的箭头和数字表示相应的平均值。

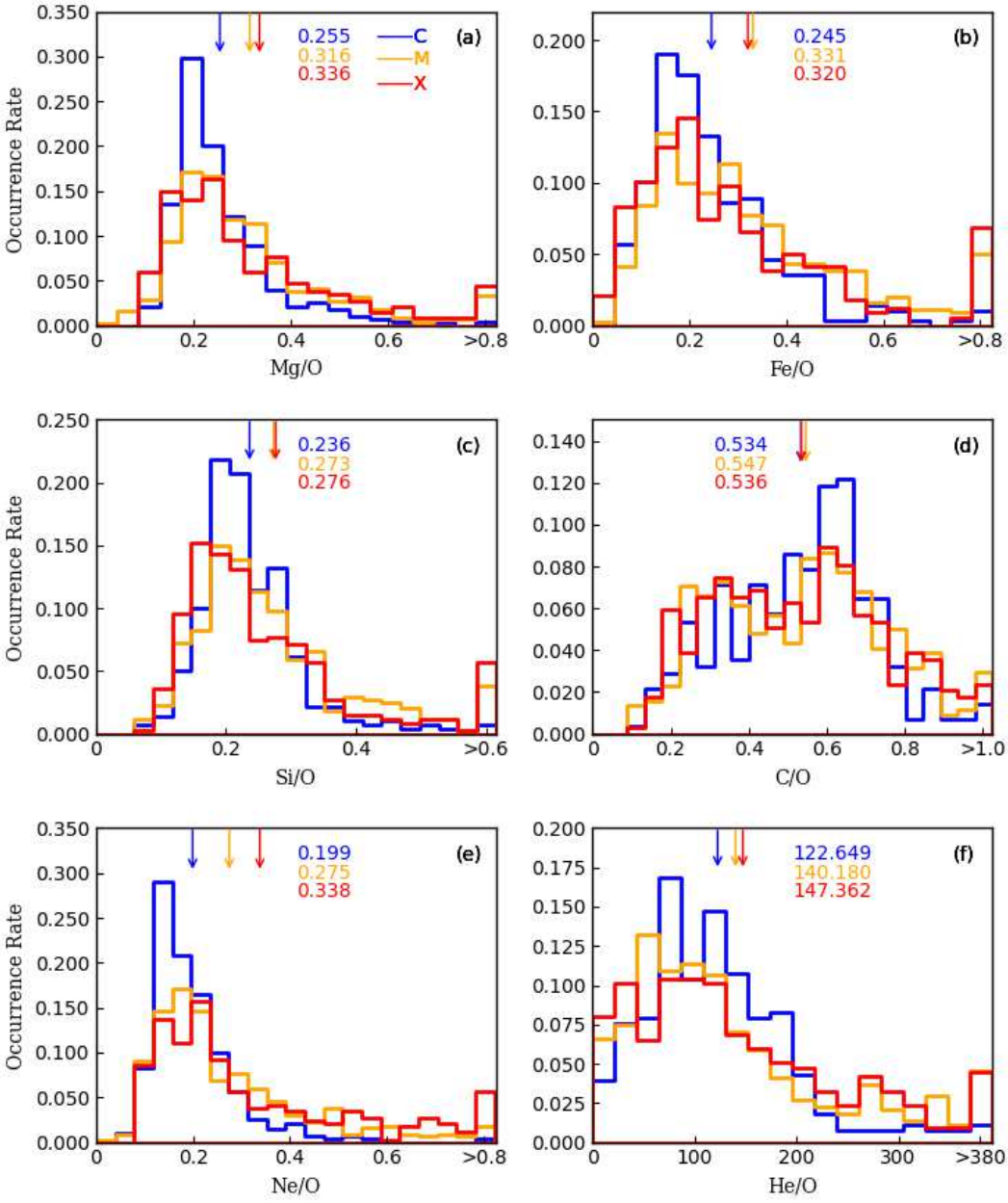


图 4. 与 C 级（蓝色）、M 级（橙色）和 X 级（红色）耀斑相关的行星际日冕物质抛射中镁/氧 (a)、铁/氧 (b)、硅/氧 (c)、碳/氧 (d)、氖/氧 (e) 和氦氧比 (f) 的直方图。各面板中的箭头和数字表示相应的平均值。