

XTE J1550–564 2001年“迷你爆发” 的X射线能谱研究*

葛 康^{1,2} 董爱军^{1,2†} 刘 畅^{1,2} 支启军^{1,2}

(1 贵州师范大学物理与电子科学学院 贵阳 550001)

(2 贵州师范大学贵州射电天文数据处理重点实验室 贵阳 550001)

摘要 黑洞X射线暂现源的迷你爆发是一类峰值光度较低、持续时间较短的爆发。由于观测数据较少,其物理机制仍不清楚。利用RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)卫星从2001年1月28日到3月14日的数据,研究了黑洞X射线暂现源XTE J1550–564 2001年迷你爆发的X射线能谱特性。发现在本次迷你爆发中,XTE J1550–564的X射线能谱可以用幂律谱很好地拟合。整个爆发的硬度强度图不是标准的q型,而是一直保持在最右侧。此外,还分析了此次爆发谱指数 Γ 与未吸收的2–10 keV能段的X射线流量 $F_{2-10\text{ keV}}$ 的相关性,发现 $\Gamma-F_{2-10\text{ keV}}$ 呈反相关关系,且谱指数 $\Gamma \in [1.35, 1.72]$ 。上述结果表明2001年这次爆发一直处于低/硬态,它的X射线辐射主要来自于辐射低效的吸积模式,如ADAF (Advection-Dominated Accretion Flow)。

关键词 恒星: 黑洞, X射线: 个别: XTE J1550–564, 黑洞物理, 吸积

中图分类号: P153; **文献标识码**: A

1 引言

黑洞X射线双星多为暂现源,根据能谱特性可以将它的能谱分为4个主要谱态^[1–3]: 宁静态(Quiescent State, QS)、低/硬态(Low/Hard State, LHS)、中间态(Intermediate State, IMS)和高/软态(High/Soft State, HSS)。一般情况下,黑洞X射线双星处于宁静态,随着物质在吸积盘的堆积,黑洞X射线双星将发生爆发。爆发的开始和结束阶段是低/硬态,此时光度较低,能谱较硬($1.5 < \Gamma < 2.0$),X射线能谱以幂律成分为主。随着光度增加,黑洞X射线双星将进入高/软态,此时光度很高,光度变化较小,能谱较软($\Gamma > 2.0$),X射线能谱以黑体辐射为主。低/硬态与高/软态之间是中间态,中间态X射线能谱的盘成分和幂律成分都很强。根据两个成分比重的不同,中间态可分为硬中间态和软中间态。正常爆发的光度一般大于 $10^{38}\text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$,滞后效应(hysteresis)非常明显^[4–5],爆发过程在硬度强度图中的演化轨迹像q型,常被称为q型图^[6–7]。

2020-10-09收到原稿,2021-03-04收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1831120、U1731238),贵州省科学技术基金项目([2019]1241、[2017]7349)资助

†ajdong@gznu.edu.cn

研究表明黑洞X射线双星的X射线谱指数 Γ 与X射线光度 L_X 存在明显的相关性: 当其与爱丁顿光度的比值 $\frac{L_X}{L_{\text{Edd}}}$ 小于某一临界值时, Γ 与 $\frac{L_X}{L_{\text{Edd}}}$ 呈反相关; 当 $\frac{L_X}{L_{\text{Edd}}}$ 大于该临界值时, Γ 与 $\frac{L_X}{L_{\text{Edd}}}$ 呈正相关^[8]. Qiao等^[9]和Cao^[10]研究了 Γ 与 $\frac{L_X}{L_{\text{Edd}}}$ 呈正相关和反相关时的吸积模式, 发现呈反相关和正相关时吸积模式分别由辐射低效的吸积模式(如: ADAF (Advection-Dominated Accretion Flow))和辐射高效的吸积模式(如: SSD (Shakura-Sunyaev Disk)-corona)主导.

然而, 有一类爆发的硬度强度图一般不是标准的q型图, 且爆发的峰值光度远小于标准爆发, 持续时间也比标准爆发更短, 通常把这类爆发称为“迷你爆发”(Mini-outburst)^[11]或失败的爆发(failed outburst)^[12]. 这类X射线爆发一般开始于宁静态, 峰值光度约为 10^{35} – 10^{37} erg·s⁻¹^[4], 它们有些总保持在低/硬态^[13], 有些到达中间态就直接回到低/硬态^[7, 14–15]. 在黑洞X射线双星(如: GX 339–4^[16–18]、H1743–322^[19–20]、GRO J0422+32^[21]和XTE J1650–500^[22])、中子星低质量X射线双星(如: SAX J1808.4–3658^[23])以及WZ Sge型矮新星^[24]中都观测到了迷你爆发. 目前, 迷你爆发的物理机制仍不清楚. 不同的吸积系统中都观测到了相似的迷你爆发, 暗示迷你爆发可能与吸积率有关, 而与中心致密天体类型无关^[25].

XTE J1550–564是低质量的黑洞X射线双星^[12]. 其中心黑洞质量 $M_{\text{BH}} = 9.1 \pm 0.6 M_{\odot}$, 距离 $D = 4.4_{-0.4}^{+0.6}$ kpc^[26–27]. 它于1998年9月6日被RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)首次发现, 这是一次光度相当高的爆发, 在爆发两周内X射线流量(2–10 keV)就急剧增加到6.8 Crab (Crab 表示蟹状星云在相应能段的流量), 爆发过程中表现出不规则的光变曲线、谱态跃迁和准周期振荡^[28–31]. 此后XTE J1550–564又经历了4次爆发, 包括2000年的完整爆发^[32]以及2001年、2002年^[33]和2003年^[12]的3次迷你爆发. 由于观测数据较少、光度较低, 2001年的迷你爆发研究较少. 本文的主要目的是通过2001年的迷你爆发与2000年的正常爆发的对比, 分析研究迷你爆发的能谱特性及其内在的物理机制. 文章结构如下: 第2节简单介绍了数据处理, 第3节是结果, 第4节是总结与讨论.

2 数据处理

为了研究黑洞X射线双星XTE J1550–564在2001年迷你爆发的X射线能谱特性, 本文处理与分析了XTE J1550–564 2001年1月28日至3月14日的PCA (Proportional Counter Array)数据, 共计32个观测点, 约48.5 ks. 此外, 本文还处理了2000年4月10日至6月12日的正常爆发, 共计47个观测点, 约92.7 ks, 用于与2001年的迷你爆发进行对比. 表1和表2分别显示了XTE J1550–564在2000年和2001年两次爆发的基本情况, 从左至右分别为: 观测号(Obs. Id)、观测日期、观测时间、曝光时间(Exp)、PCA计数率和硬度比(Hardness Ratio, HR). 其中计数率的能段取PCA的有效能段(2–60 keV), HR为5–12 keV能段与3–5 keV能段的计数率之比.

使用Heasoft 6.25软件, 根据RXTE cook book天文观测数据处理的标准步骤对X射线数据进行处理. 在X射线能谱提取时, 仅使用标准2数据中的PCU (Proportional Counter Unit) 2数据^[34], 其固有时间分辨率为16 s. 使用saextract命令提取能谱. 使用pcabackest命令生成背景谱并在数据中去掉背景, 生成背景谱时需根据亮度情况选择最新的PCA背景模型(faint or bright). 使用pcarsp命令生成PCA响应矩阵. 系统误差

在20通道之前和20通道之后分别取为0.8%和0.4%^[35]. 利用Xspec 12.10.1能谱分析软件, 选取了3-25 keV (4-52通道)的能谱进行分析. 本文主要目的是获得硬X射线能谱指数和未吸收的X射线流量, 所以使用尽量简单的模型. 首先采用幂律成分(powerlaw)和吸收成分(phabs)进行拟合, 其中氢柱密度固定为 $N_{\text{H}} = 0.32 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ^[28]. 若拟合效果较差(卡方值 $\chi^2 > 1.5$), 将引入高斯成分(gaussian)和盘成分(diskbb), 并通过 F 检验判断是否引入新的成分. 表3和表4分别列出了XTE J1550-564在2000年和2001年两次爆发的拟合情况, 从左至右分别是: 观测号、未吸收的2-10 keV能段的X射线流量 F_{total} 及其中幂律成分的流量 F_{pow} 、谱指数 Γ 、拟合结果的卡方值 χ^2 与拟合模型, 拟合模型中的pow和gau分别表示幂律和高斯成分.

表 1 XTE J1550-564在2000年爆发的观测数据
Table 1 Observational data of outburst of XTE J1550-564 in 2000

Obs. Id	Date (2000)	Time	Exp/s	Rate/(cts · s ⁻¹) ^a	HR ^b
50137-02-01-00	Apr 10	11:12:00	3712	424.70	1.91
50137-02-02-00	Apr 12	07:53:32	1792	491.10	1.89
50137-02-02-01	Apr 12	14:36:22	2480	497.80	1.90
50137-02-03-00	Apr 14	17:32:01	2576	535.60	1.89
50137-02-04-00	Apr 16	17:31:06	2512	567.20	1.89
50137-02-04-01	Apr 17	08:59:55	3616	579.40	1.88
50137-02-05-00	Apr 18	05:50:57	1872	617.60	1.88
50137-02-05-01	Apr 19	12:40:07	2032	660.90	1.87
50137-02-06-00	Apr 20	17:04:22	2656	690.10	1.86
50137-02-07-00	Apr 21	15:51:34	832	709.60	1.83
50134-02-01-00	Apr 24	14:19:07	832	831.60	1.66
50134-02-01-01	Apr 26	01:22:07	3984	1039.00	1.18
50134-02-02-00	Apr 28	03:57:09	1120	2053.00	0.82
50134-02-02-01	Apr 30	09:32:40	2256	1496.00	0.62
50134-02-03-00	Apr 30	15:10:22	2848	1572.00	0.65
50134-02-03-01	May 1	09:27:59	1408	1238.00	0.59
50134-02-04-00	May 3	16:37:31	2512	1067.00	0.57
50134-02-04-01	May 4	19:46:33	2736	984.80	0.56
50134-02-05-00	May 5	04:24:34	4240	955.20	0.54
50134-02-06-00	May 6	12:53:47	2816	905.50	0.62
50134-02-07-00	May 6	17:57:39	2864	875.50	0.56
50134-02-07-01	May 7	09:50:37	1344	837.70	0.54
50134-02-08-00	May 8	09:42:40	1568	786.50	0.59

表 1 续
Table 1 Continued

Obs. Id	Date (2000)	Time	Exp/s	Rate/(cts · s ⁻¹) ^a	HR ^b
50134-02-08-01	May 8	22:56:41	1520	1019.00	0.72
50134-01-01-00	May 9	09:37:42	1552	958.10	0.70
50134-01-02-00	May 10	16:33:41	928	965.30	0.79
50134-01-03-00	May 11	10:56:41	2368	721.90	0.92
50134-01-04-00	May 12	09:28:39	1392	617.90	0.95
50134-01-05-00	May 14	10:44:50	2432	511.50	1.22
50135-01-01-00	May 16	08:59:31	2048	450.50	1.28
50135-01-02-00	May 18	07:11:00	1728	352.80	1.53
50135-01-03-00	May 19	18:21:17	2688	285.50	1.72
50135-01-04-00	May 20	18:13:58	848	253.80	1.75
50135-01-05-00	May 22	06:59:58	1552	206.20	1.78
50135-01-06-00	May 23	05:16:36	1424	182.70	1.81
50135-01-07-00	May 24	19:57:59	1712	140.70	1.85
50135-01-08-00	May 26	18:24:07	1008	107.40	1.88
50135-01-08-01	May 26	20:07:07	752	108.10	1.86
50135-01-09-00	May 28	13:11:57	1744	80.29	1.88
50135-01-10-00	May 29	09:24:04	1728	70.00	1.89
50135-01-11-00	May 31	06:03:05	1712	55.37	1.84
50135-01-12-00	Jun 1	11:19:07	1712	47.99	1.85
50135-01-13-00	Jun 3	22:21:21	1152	36.22	1.83
50135-01-14-00	Jun 7	11:57:43	1936	21.86	1.76
50135-01-15-00	Jun 8	15:16:44	1408	19.37	1.79
50135-01-16-00	Jun 10	23:21:52	1264	14.44	1.75
50135-01-17-00	Jun 12	11:35:57	1488	11.50	1.66

^a Rate is the RXTE PCA counts rate of 2–60 keV.

^b The hardness ratio (HR) is defined as $HR = C/A$, where A and C are the net counts rate in 3–5 keV and 5–12 keV band, respectively.

表 2 XTE J1550-564在2001年爆发的观测数据
Table 2 Observational data of outburst of XTE J1550-564 in 2001

Obs. Id	Date (2001)	Time	Exp/s	Rate/(cts·s ⁻¹)	HR
50427-01-01-00	Jan 28	18:10:16	2448	64.91	2.27
50137-02-08-01	Jan 31	12:55:27	1280	85.43	2.19
50137-02-08-00	Jan 31	22:54:38	2336	86.60	2.23
50137-02-09-00	Feb 2	17:31:22	2480	97.08	2.21
50137-02-10-00	Feb 4	16:05:07	928	103.30	2.20
50137-02-11-00	Feb 6	22:08:30	944	111.60	2.18
50137-02-12-00	Feb 8	12:02:40	1344	115.50	2.15
50137-02-13-00	Feb 9	19:49:02	3360	118.10	2.18
50137-02-13-01	Feb 10	00:48:02	2672	119.30	2.17
50137-02-13-02	Feb 10	02:39:02	1744	116.90	2.17
50137-02-14-00	Feb 10	13:21:44	1456	122.30	2.19
50137-02-15-00	Feb 12	19:38:17	1216	114.10	2.16
50137-02-16-00	Feb 15	12:34:35	1824	117.00	2.17
50137-02-17-00	Feb 17	13:56:03	1840	113.70	2.18
50137-02-18-00	Feb 19	10:26:49	1696	110.80	2.15
50137-02-19-00	Feb 20	13:50:19	2576	106.60	2.16
50137-02-19-01	Feb 20	17:02:18	2528	105.90	2.23
50137-02-20-00	Feb 22	01:28:19	336	103.80	2.14
50137-02-21-00	Feb 24	07:25:20	912	86.91	2.14
50137-02-22-00	Feb 26	02:08:48	1184	73.84	2.19
50137-02-23-00	Feb 28	14:10:23	1744	59.72	2.08
50137-02-24-00	Mar 2	04:08:45	752	47.31	2.05
50137-02-24-01	Mar 2	07:20:23	752	46.50	2.12
50137-02-25-02	Mar 4	07:05:23	928	31.32	2.01
50137-02-25-01	Mar 4	10:16:23	928	34.27	2.05
50137-02-25-00	Mar 4	13:27:22	960	30.58	2.05
50137-02-26-00	Mar 6	05:59:26	2704	26.50	2.03
50137-02-27-00	Mar 8	09:47:59	1408	19.77	1.91
50137-02-28-00	Mar 10	14:49:30	1136	16.19	1.90
50137-02-29-00	Mar 12	12:19:18	384	14.36	1.74
50137-02-30-00	Mar 14	03:10:24	912	15.30	1.87
50137-02-30-01	Mar 14	17:34:35	816	12.58	1.79

表 3 XTE J1550-564 在 2000 年爆发的拟合结果
 Table 3 The spectral fitting results of outburst of XTE J1550-564 in 2000

Obs. Id	$F_{\text{total}}^{\text{a}}$	$F_{\text{pow}}^{\text{b}}$	Γ	χ^2 (dof)	Model ^c
50137-02-01-00	$309.70^{+0.74}_{-0.74}$	$267.00^{+0.67}_{-0.67}$	$1.43^{+0.03}_{-0.03}$	1.01 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-02-00	$359.53^{+1.01}_{-1.02}$	$302.82^{+0.91}_{-0.91}$	$1.42^{+0.03}_{-0.04}$	0.78 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-02-01	$370.35^{+0.94}_{-0.95}$	$312.84^{+0.84}_{-0.84}$	$1.43^{+0.02}_{-0.02}$	0.71 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-03-00	$394.77^{+0.97}_{-0.98}$	$339.26^{+0.88}_{-0.88}$	$1.44^{+0.02}_{-0.03}$	0.98 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-04-00	$420.44^{+1.03}_{-1.03}$	$356.18^{+0.91}_{-0.92}$	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	1.23 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-04-01	$428.64^{+0.94}_{-0.94}$	$365.76^{+0.84}_{-0.84}$	$1.44^{+0.01}_{-0.02}$	0.68 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-05-00	$458.25^{+1.19}_{-1.19}$	$394.19^{+1.07}_{-1.07}$	$1.46^{+0.02}_{-0.03}$	0.91 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-05-01	$490.96^{+1.22}_{-1.22}$	$417.29^{+1.10}_{-1.10}$	$1.46^{+0.03}_{-0.04}$	0.52 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-06-00	$512.81^{+1.17}_{-1.17}$	$431.17^{+1.04}_{-1.04}$	$1.46^{+0.03}_{-0.03}$	0.68 (41)	diskbb+gau+pow
50137-02-07-00	$536.93^{+1.71}_{-1.72}$	$460.58^{+1.57}_{-1.57}$	$1.50^{+0.02}_{-0.03}$	0.93 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-01-00	$671.27^{+2.09}_{-2.10}$	$560.43^{+1.89}_{-1.89}$	$1.66^{+0.02}_{-0.02}$	0.89 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-01-01	$1016.95^{+2.15}_{-2.15}$	$694.07^{+1.58}_{-1.59}$	$2.01^{+0.02}_{-0.02}$	0.95 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-02-00	$2217.07^{+6.02}_{-6.03}$	$1069.33^{+3.60}_{-3.61}$	$2.22^{+0.03}_{-0.03}$	0.80 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-02-01	$1762.26^{+4.77}_{-4.78}$	$515.30^{+1.86}_{-1.87}$	$2.17^{+0.04}_{-0.04}$	0.56 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-03-00	$1856.09^{+4.67}_{-4.68}$	$553.85^{+1.80}_{-1.81}$	$2.16^{+0.03}_{-0.04}$	0.74 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-03-01	$1499.58^{+4.78}_{-4.79}$	$415.04^{+1.90}_{-1.90}$	$2.16^{+0.04}_{-0.05}$	0.65 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-04-00	$1320.44^{+3.85}_{-3.86}$	$330.83^{+1.33}_{-1.33}$	$2.10^{+0.04}_{-0.05}$	0.59 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-04-01	$1218.06^{+3.56}_{-3.57}$	$297.21^{+1.20}_{-1.20}$	$2.09^{+0.04}_{-0.04}$	1.06 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-05-00	$1199.39^{+3.26}_{-3.27}$	$275.24^{+0.99}_{-1.00}$	$2.09^{+0.03}_{-0.03}$	1.03 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-06-00	$1099.06^{+3.17}_{-3.18}$	$303.49^{+1.18}_{-1.18}$	$2.06^{+0.04}_{-0.04}$	0.63 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-07-00	$1092.60^{+3.26}_{-3.27}$	$252.19^{+1.06}_{-1.06}$	$2.04^{+0.04}_{-0.04}$	0.62 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-07-01	$1065.05^{+3.85}_{-3.87}$	$232.32^{+1.33}_{-1.33}$	$2.04^{+0.07}_{-0.06}$	1.23 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-08-00	$984.33^{+3.41}_{-3.42}$	$230.31^{+1.22}_{-1.22}$	$1.99^{+0.07}_{-0.06}$	0.72 (41)	diskbb+gau+pow
50134-02-08-01	$1184.02^{+3.70}_{-3.71}$	$410.66^{+1.76}_{-1.76}$	$2.11^{+0.04}_{-0.05}$	0.53 (41)	diskbb+gau+pow
50134-01-01-00	$1123.88^{+3.58}_{-3.59}$	$396.07^{+1.73}_{-1.73}$	$2.16^{+0.04}_{-0.05}$	0.83 (41)	diskbb+gau+pow
50134-01-02-00	$1090.18^{+3.78}_{-3.79}$	$446.99^{+2.09}_{-2.09}$	$2.08^{+0.05}_{-0.05}$	0.70 (41)	diskbb+gau+pow
50134-01-03-00	$785.83^{+2.25}_{-2.26}$	$368.44^{+1.30}_{-1.31}$	$2.03^{+0.03}_{-0.04}$	0.64 (41)	diskbb+gau+pow
50134-01-04-00	$666.50^{+2.26}_{-2.27}$	$322.18^{+1.40}_{-1.40}$	$2.01^{+0.04}_{-0.05}$	0.54 (41)	diskbb+gau+pow
50134-01-05-00	$493.37^{+1.44}_{-1.44}$	$310.38^{+1.05}_{-1.05}$	$1.90^{+0.03}_{-0.04}$	0.89 (41)	diskbb+gau+pow
50135-01-01-00	$420.92^{+1.31}_{-1.32}$	$279.47^{+1.01}_{-1.01}$	$1.86^{+0.03}_{-0.04}$	0.60 (41)	diskbb+gau+pow
50135-01-02-00	$298.59^{+1.01}_{-1.01}$	$231.91^{+0.87}_{-0.87}$	$1.71^{+0.03}_{-0.04}$	0.70 (41)	diskbb+gau+pow

表 3 续
Table 3 Continued

Obs. Id	$F_{\text{total}}^{\text{a}}$	$F_{\text{pow}}^{\text{b}}$	Γ	χ^2 (dof)	Model ^c
50135-01-03-00	$222.92_{-0.69}^{+0.69}$	$181.16_{-0.61}^{+0.60}$	$1.54_{-0.02}^{+0.02}$	0.60 (41)	diskbb+gau+pow
50135-01-04-00	$195.40_{-0.92}^{+0.92}$	$163.63_{-0.84}^{+0.84}$	$1.53_{-0.05}^{+0.04}$	0.80 (41)	diskbb+gau+pow
50135-01-05-00	$160.04_{-0.67}^{+0.67}$	$145.67_{-0.64}^{+0.64}$	$1.60_{-0.05}^{+0.03}$	1.30 (41)	diskbb+gau+pow
50135-01-06-00	$141.00_{-0.63}^{+0.63}$	$139.55_{-0.63}^{+0.63}$	$1.66_{-0.10}^{+0.01}$	0.99 (43)	gau+pow
50135-01-07-00	$107.46_{-0.50}^{+0.50}$	$106.67_{-0.50}^{+0.50}$	$1.62_{-0.01}^{+0.01}$	1.09 (43)	gau+pow
50135-01-08-00	$81.52_{-0.53}^{+0.53}$	$81.52_{-0.53}^{+0.53}$	$1.61_{-0.01}^{+0.01}$	1.41 (46)	pow
50135-01-08-01	$82.69_{-0.60}^{+0.60}$	$82.69_{-0.60}^{+0.60}$	$1.62_{-0.02}^{+0.02}$	1.20 (46)	pow
50135-01-09-00	$60.61_{-0.36}^{+0.36}$	$60.61_{-0.36}^{+0.36}$	$1.60_{-0.01}^{+0.01}$	1.40 (46)	pow
50135-01-10-00	$52.91_{-0.34}^{+0.34}$	$52.91_{-0.34}^{+0.34}$	$1.60_{-0.01}^{+0.01}$	0.95 (46)	pow
50135-01-11-00	$42.24_{-0.31}^{+0.31}$	$42.24_{-0.31}^{+0.31}$	$1.62_{-0.02}^{+0.02}$	1.15 (46)	pow
50135-01-12-00	$36.58_{-0.29}^{+0.29}$	$36.58_{-0.29}^{+0.29}$	$1.62_{-0.02}^{+0.02}$	0.80 (46)	pow
50135-01-13-00	$28.24_{-0.33}^{+0.33}$	$28.24_{-0.33}^{+0.33}$	$1.66_{-0.03}^{+0.03}$	0.87 (46)	pow
50135-01-14-00	$17.13_{-0.21}^{+0.21}$	$17.13_{-0.21}^{+0.21}$	$1.69_{-0.03}^{+0.03}$	0.61 (46)	pow
50135-01-15-00	$15.17_{-0.23}^{+0.23}$	$15.17_{-0.23}^{+0.23}$	$1.70_{-0.04}^{+0.04}$	0.64 (46)	pow
50135-01-16-00	$11.30_{-0.23}^{+0.23}$	$11.30_{-0.23}^{+0.23}$	$1.71_{-0.05}^{+0.05}$	0.84 (46)	pow
50135-01-17-00	$9.32_{-0.2}^{+0.2}$	$9.32_{-0.2}^{+0.2}$	$1.78_{-0.05}^{+0.05}$	0.60 (46)	pow

^a F_{total} is X-ray flux of the unabsorbed 2–10 keV, and the unit is $10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

^b F_{pow} is X-ray flux of the unabsorbed 2–10 keV of power law components, and the unit is $10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

^c An absorption model, phabs, was used in all fittings, where the gau is gaussian, the pow is power law.

3 结果

从表1可以看出2000年的正常爆发在4月28日时计数率达到峰值为 $2053 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.54 < \text{HR} < 1.91$. 同样, 从表2可以看出2001年的迷你爆发在2月10日时计数率达到峰值为 $122.3 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.74 < \text{HR} < 2.27$.

从表3可以看出2000年的正常爆发中, F_{total} 的峰值为 $2217.07 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($L_{\text{X}} \sim 4.3\%L_{\text{Edd}}$), 谱指数 $\Gamma \sim 1.42\text{--}2.22$, $\chi^2 \leq 1.41$. $F_{\text{total}} \geq 160.04 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 模型主要以diskbb+gaussian+powerlaw为主; $F_{\text{total}} \leq 141.00 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 模型主要以gaussian+powerlaw或powerlaw为主. 同样, 表4可以看出2001年的迷你爆发中, F_{total} 的峰值为 $84.21 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($L_{\text{X}} \sim 0.16\%L_{\text{Edd}}$), 谱指数 $\Gamma \sim 1.35\text{--}1.72$, $\chi^2 \leq 1.50$. 模型主要以gaussian+powerlaw或powerlaw为主.

表 4 XTE J1550-564 在 2001 年爆发的拟合结果
 Table 4 The spectral fitting results of outburst of XTE J1550-564 in 2001

Obs. Id	F_{total}	F_{pow}	Γ	χ^2 (dof)	Model
50427-01-01-00	$44.96^{+0.26}_{-0.26}$	$43.54^{+0.26}_{-0.26}$	$1.35^{+0.02}_{-0.02}$	0.79 (43)	gau+pow
50137-02-08-01	$60.09^{+0.39}_{-0.39}$	$58.34^{+0.39}_{-0.39}$	$1.38^{+0.02}_{-0.03}$	0.91 (43)	gau+pow
50137-02-08-00	$59.98^{+0.30}_{-0.30}$	$58.21^{+0.30}_{-0.30}$	$1.35^{+0.02}_{-0.02}$	1.18 (43)	gau+pow
50137-02-09-00	$67.46^{+0.32}_{-0.32}$	$65.81^{+0.31}_{-0.31}$	$1.37^{+0.01}_{-0.02}$	1.06 (43)	gau+pow
50137-02-10-00	$71.54^{+0.48}_{-0.48}$	$68.94^{+0.48}_{-0.48}$	$1.36^{+0.03}_{-0.04}$	0.71 (43)	gau+pow
50137-02-11-00	$78.01^{+0.50}_{-0.50}$	$76.40^{+0.50}_{-0.50}$	$1.38^{+0.02}_{-0.02}$	0.81 (43)	gau+pow
50137-02-12-00	$81.33^{+0.45}_{-0.45}$	$80.44^{+0.44}_{-0.44}$	$1.40^{+0.01}_{-0.01}$	1.22 (43)	gau+pow
50137-02-13-00	$81.46^{+0.31}_{-0.31}$	$78.61^{+0.31}_{-0.31}$	$1.35^{+0.02}_{-0.02}$	1.21 (43)	gau+pow
50137-02-13-01	$83.05^{+0.34}_{-0.34}$	$81.54^{+0.34}_{-0.34}$	$1.38^{+0.01}_{-0.02}$	1.50 (43)	gau+pow
50137-02-13-02	$81.45^{+0.40}_{-0.40}$	$78.86^{+0.40}_{-0.40}$	$1.38^{+0.02}_{-0.02}$	1.04 (43)	gau+pow
50137-02-14-00	$84.21^{+0.43}_{-0.43}$	$81.98^{+0.43}_{-0.43}$	$1.36^{+0.02}_{-0.05}$	1.19 (43)	gau+pow
50137-02-15-00	$80.40^{+0.46}_{-0.46}$	$79.04^{+0.46}_{-0.46}$	$1.40^{+0.01}_{-0.02}$	0.72 (43)	gau+pow
50137-02-16-00	$81.29^{+0.39}_{-0.39}$	$78.74^{+0.39}_{-0.39}$	$1.37^{+0.02}_{-0.02}$	1.30 (43)	gau+pow
50137-02-17-00	$79.20^{+0.39}_{-0.39}$	$76.77^{+0.38}_{-0.38}$	$1.37^{+0.02}_{-0.03}$	1.17 (43)	gau+pow
50137-02-18-00	$77.32^{+0.39}_{-0.39}$	$75.08^{+0.39}_{-0.39}$	$1.37^{+0.02}_{-0.03}$	0.83 (43)	gau+pow
50137-02-19-00	$74.91^{+0.33}_{-0.33}$	$73.42^{+0.33}_{-0.33}$	$1.39^{+0.01}_{-0.01}$	1.36 (43)	gau+pow
50137-02-19-01	$72.91^{+0.32}_{-0.32}$	$70.76^{+0.32}_{-0.32}$	$1.34^{+0.02}_{-0.02}$	1.11 (43)	gau+pow
50137-02-20-00	$73.23^{+0.78}_{-0.78}$	$73.23^{+0.78}_{-0.78}$	$1.41^{+0.02}_{-0.02}$	1.06 (43)	pow
50137-02-21-00	$61.14^{+0.45}_{-0.45}$	$58.94^{+0.45}_{-0.45}$	$1.40^{+0.03}_{-0.04}$	1.20 (43)	gau+pow
50137-02-22-00	$51.91^{+0.38}_{-0.38}$	$50.31^{+0.38}_{-0.38}$	$1.38^{+0.02}_{-0.03}$	0.76 (43)	gau+pow
50137-02-23-00	$42.33^{+0.29}_{-0.29}$	$40.39^{+0.29}_{-0.29}$	$1.41^{+0.04}_{-0.06}$	0.90 (43)	gau+pow
50137-02-24-00	$34.64^{+0.40}_{-0.40}$	$34.64^{+0.40}_{-0.40}$	$1.50^{+0.02}_{-0.02}$	0.91 (46)	pow
50137-02-24-01	$33.44^{+0.39}_{-0.39}$	$33.44^{+0.39}_{-0.39}$	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	1.00 (46)	pow
50137-02-25-02	$23.98^{+0.32}_{-0.32}$	$23.98^{+0.32}_{-0.32}$	$1.56^{+0.03}_{-0.03}$	0.91 (46)	pow
50137-02-25-01	$25.49^{+0.33}_{-0.33}$	$25.49^{+0.33}_{-0.33}$	$1.50^{+0.03}_{-0.03}$	1.38 (46)	pow
50137-02-25-00	$22.46^{+0.31}_{-0.31}$	$22.46^{+0.31}_{-0.31}$	$1.49^{+0.03}_{-0.03}$	0.66 (46)	pow
50137-02-26-00	$19.73^{+0.18}_{-0.18}$	$19.07^{+0.18}_{-0.18}$	$1.51^{+0.03}_{-0.03}$	0.96 (43)	gau+pow
50137-02-27-00	$15.15^{+0.23}_{-0.23}$	$15.15^{+0.23}_{-0.23}$	$1.60^{+0.03}_{-0.03}$	0.42 (46)	pow
50137-02-28-00	$12.57^{+0.24}_{-0.24}$	$12.57^{+0.24}_{-0.24}$	$1.64^{+0.04}_{-0.04}$	0.65 (46)	pow
50137-02-29-00	$11.94^{+0.40}_{-0.40}$	$11.94^{+0.40}_{-0.40}$	$1.72^{+0.08}_{-0.08}$	0.58 (46)	pow
50137-02-30-00	$11.94^{+0.26}_{-0.26}$	$11.94^{+0.26}_{-0.26}$	$1.62^{+0.05}_{-0.05}$	0.91 (46)	pow
50137-02-30-01	$10.07^{+0.28}_{-0.28}$	$10.07^{+0.28}_{-0.28}$	$1.72^{+0.07}_{-0.06}$	0.54 (46)	pow

图1是XTE J1550-564在2000年与2001年两次爆发的硬度强度图. 箭头表示硬度强度图的演化方向. 从图中可以看出两次爆发的硬度强度图显示出明显差异. 2000年的正常爆发(灰色)经历了LHS-IMS-HSS-IMS-LHS的状态转变, 呈现出标准的q型. 最右侧时 $HR \sim 1.7-1.9$. PCU计数率约为 $800 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$ 时逐渐变软. 高/软态时PCU计数率较稳定, $HR \sim 0.6$. 高/软态之后, 经过反向中间态又回到了低/硬态, 滞后效应较明显. 2001年的迷你爆发(黑色)不是标准的q型, 而是一直处于硬度强度图右下侧. 此次迷你爆发没有体现出滞后效应, PCU峰值计数率较低, 约为 $120 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$. 其中计数率上升阶段 $HR \sim 2.2$, 下降阶段 $HR \sim 1.8-2.1$.

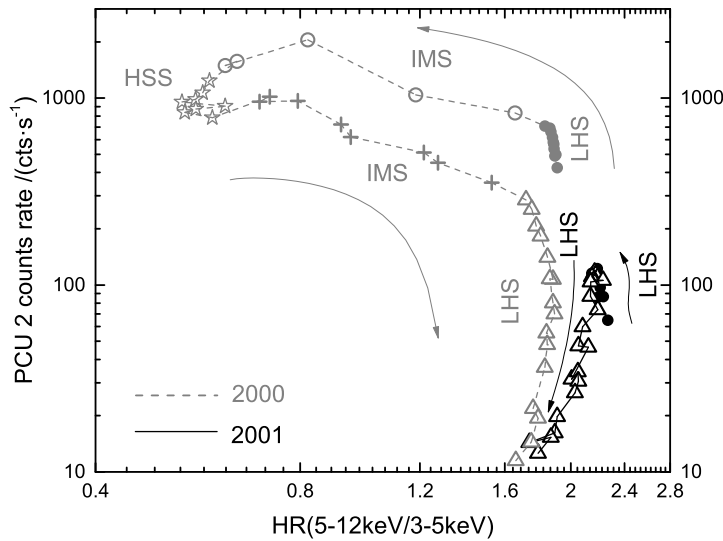


图1 XTE J1550-564在2000年与2001年两次爆发的硬度强度图. 灰色和黑色分别代表2000年和2001年的爆发, 箭头表示硬度强度图的演化方向. 实心圆和三角形分别代表爆发开始和结束阶段的低/硬态, 空心圆和十字分别代表正向和反向的中间态, 五角星代表高/软态.

Fig.1 Hardness intensity diagram of two outbursts of XTE J1550-564 in 2000 and 2001. Grey and black represent the outbursts in 2000 and 2001 respectively, and the arrow indicates the evolution direction of hardness intensity diagram. Solid circles and triangles represent low/hard states at the beginning and end of the outburst respectively, the open circles and the crosses represent intermediate states in the positive and negative directions respectively, and the pentagrams represent high/soft states.

图2 (a)比较了XTE J1550-564在2000年与2001年两次爆发的光变曲线, 从图中可以看出两次爆发的时间间隔约为230 d. 2000年的爆发在MJD = 51662 (4月28日)时PCU计数率达到峰值为 $2053 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$ (见表1). 2001年的迷你爆发在MJD = 51950 (2月10日)时PCU计数率达到峰值为 $122.3 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$ (见表2), 约为2000年标准爆发峰值的6.0%. 图2 (a)中子图显示了2001年爆发的光变曲线, 从子图中可以看出2001年的迷你爆发, 计数率上升过程中观测到的数据较少. A、B、C和D点的能谱和残差如图3所示. 图2 (b)与图2 (c)比较了能谱中幂律成分和盘成分的流量占总流量的演化. 对比图2 (b)与图2 (c)可以看出, 2000年的正常爆发开始最初, 能谱是以幂律成分为主. 随着光度的上升, 幂律成分逐渐减小, 盘成分逐渐增加. 盘成分达到最高时, 光度不是峰值光度, 而是处于衰减初期. 之后, 随着光度降低, 幂律成分又开始增加, 盘成分逐渐降低, 最终盘成分消失, 仅存在

幂律成分. 而2001年的迷你爆发没有发现盘成分, 始终都是以幂律成分为主.

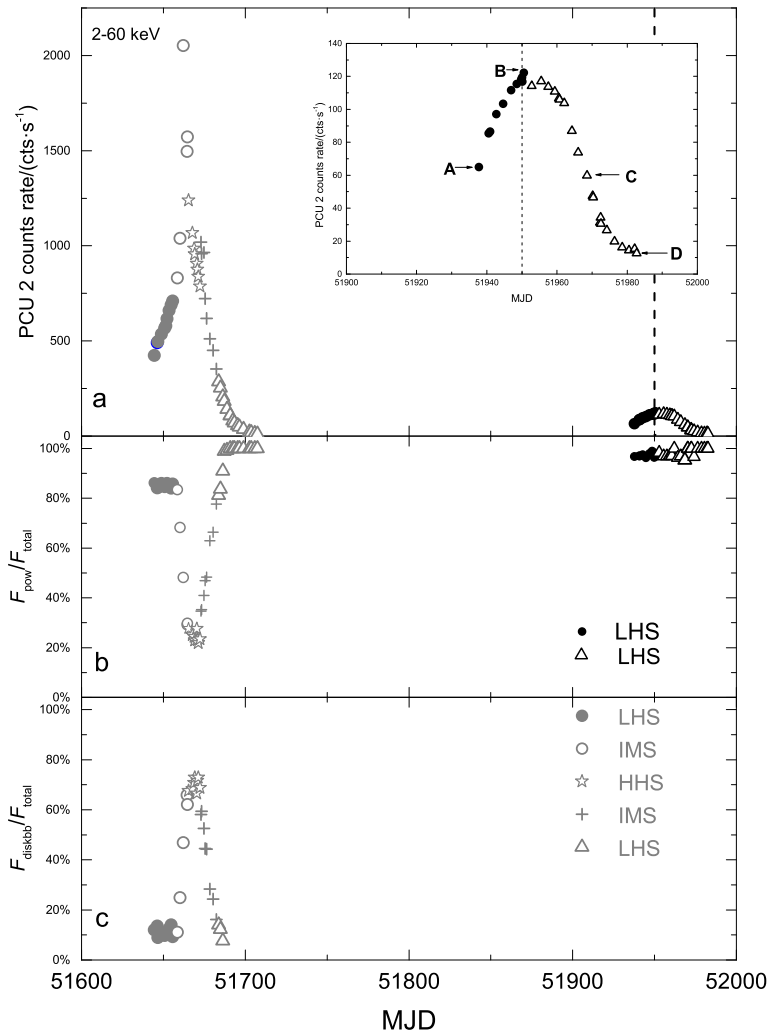


图 2 XTE J1550-564在2000年与2001年两次爆发中2-60 keV能段上的光变曲线(a)、幂律成分的流量占总流量的百分比演化(b)和盘成分的流量占总流量的百分比演化(c), 其中颜色和形状与图1一致. 图2 (a)中的子图是2001年的光变曲线, 图2 (c)中 F_{diskbb} 表示盘成分的流量.

Fig. 2 The light curve in 2-60 keV band (a), the ratio of power law component to the total flux with time (b) and the ratio of disk component to the total flux with time (c) of two outbursts of XTE J1550-564 in 2000 and 2001, in which the color and shape are the same as in Fig. 1. The subgraph in Fig. 2 (a) is the light curve in 2001, and F_{diskbb} in Fig. 2 (c) represents the flux of disk component

图3给出了图2 (a)中A、B、C、D 4点的能谱和残差, 其中A点处于计数率上升阶段, B点处于计数率峰值时期, C点和D点处于计数率衰减阶段. A、B、C 3点的X射线能谱拟合选用的是gaussian+powerlaw模型, D点的X射线能谱拟合选用的是powerlaw模型(见表4第6列). 从图3可以看出A、B、C、D 4点的X射线能谱拟合得都很好, 残差点均匀地落在水平的带状区域中, 波动范围也基本保持稳定. 表明2001年的迷你爆发中, X射线能谱拟合选用的模型较合适.

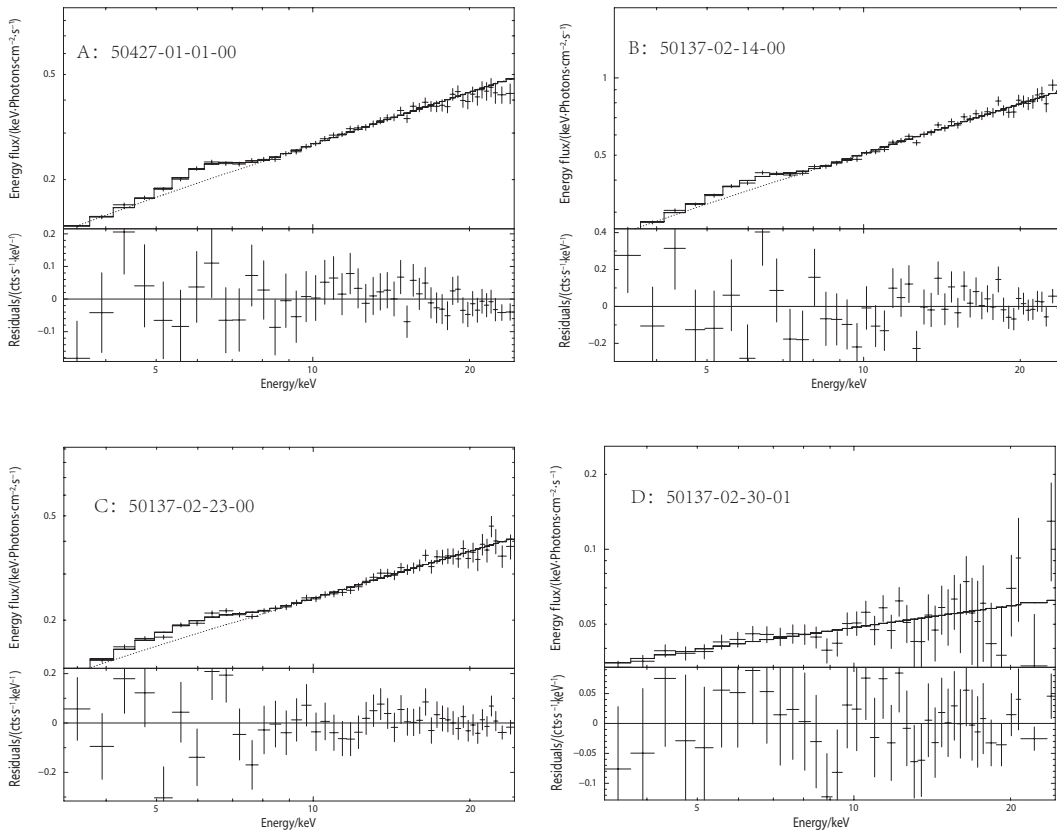


图3 XTE J1550-564在2001年爆发过程中A、B、C、D 4点的能谱及残差. 4点的Obs. Id分别为50427-01-01-00、50137-02-14-00、50137-02-23-00和50137-02-30-01 (能谱参数见表4)

Fig. 3 Energy spectra and residuals of observations A, B, C, D during the outburst of XTE J1550-564 in 2001. Their Obs. Id are 50427-01-01-00, 50137-02-14-00, 50137-02-23-00 and 50137-02-30-01 (see Tab. 4 for spectral parameters)

图4给出了XTE J1550-564在2001年迷你爆发的 Γ - $F_{2-10 \text{ keV}}$ 关系. 从图中可以看出此次迷你爆发 Γ - $F_{2-10 \text{ keV}}$ 呈反相关关系, 这种反相关关系在计数率下降过程中(空心三角形)显得尤为明显. 图中还可看出在计数率上升期间(实心圆), 这种相关性显得较平缓. 此次迷你爆发的最高光度 $L_X \sim 0.16\%L_{\text{Edd}}$, 由于没有发现明显的正相关关系, 所以无法判断是否已到达从反相关向正相关转变的临界值.

4 总结与讨论

4.1 XTE J1550-564 2000年与2001年的爆发对比

本文比较了XTE J1550-564分别在2000年与2001年的爆发, 发现在硬度强度图中, 2000年的正常爆发是典型的q型, 而2001年的迷你爆发一直在最右侧(HR ~ 1.74 -2.27). 根据能态的划分^[36], 可看出2000年的正常爆发达到了高/软态, 而2001年的迷你爆发一直保持在低/硬态. 根据黑洞X射线双星能谱性质与吸积率的相关性^[3, 37-38], 2001年的迷

你爆发吸积率可能很低.

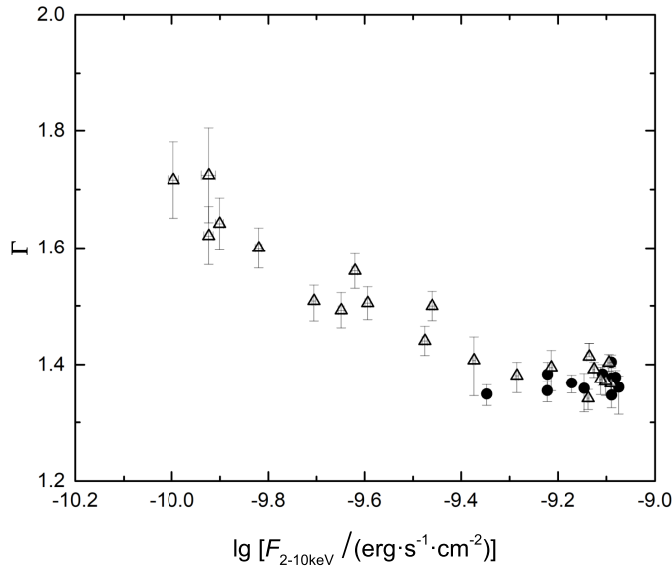


图 4 XTE J1550-564在2001年的爆发中谱指数 Γ 与未吸收的2-10 keV能段的X射线流量 $F_{2-10 \text{ keV}}$ 的关系, 其中颜色和形状与图1一致.

Fig. 4 The relation between photon index Γ , and unabsorbed 2-10 keV X-ray flux $F_{2-10 \text{ keV}}$, for XTE J1550-564 in 2001, where the color and shape are consistent with Fig. 1.

2000年的正常爆发中, 峰值计数率为 $2053 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$, X射线能谱出现了幂律谱与黑体谱. 而2001年的迷你爆发中峰值计数率只有 $122.3 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$, 约为2000年的6.0%, X射线能谱可以用powerlaw与gaussian+powerlaw拟合得很好(见表4第5、6列), 且 $\Gamma \sim 1.35-1.72$ (见表4第4列). 此次迷你爆发中, $\Gamma - F_{2-10 \text{ keV}}$ 呈反相关关系, X射线峰值光度 $L_X \sim 0.16\% L_{\text{Edd}}$. 这表明XTE J1550-564 2001年的迷你爆发光度较低, X射线能谱可以用幂律谱拟合得很好, 此次迷你爆发的X射线辐射主要来自于辐射低效的吸积模式(如: ADAF)^[9-10].

4.2 XTE J1550-564与其他黑洞迷你爆发对比

由于2001年的迷你爆发与2000年的正常爆发间隔约为230 d, 所以推测这次迷你爆发发生在2000年正常爆发进入宁静态之后. 类似在其他的黑洞暂现源(如: GRS 1739-278^[25]、H1743-322^[7]、GRO J0422+32^[21]、XTE J1650-500^[22]和MAXI J1659-1524^[39])中观察到的情况. XTE J1550-564在2001年的迷你爆发中一直保持在低/硬态(如图1), 所以它与GRS 1739-278在2015年的两次迷你爆发以及H1743-322在2008年的迷你爆发不同. 因为GRS 1739-278在2015年的两次迷你爆发呈现了典型的能谱跃迁, H1743-322在2008年的迷你爆发进入了中间态. MAXI J1659-152和XTE J1650-500的迷你爆发特性与XTE J1550-564在2001年的迷你爆发很相似, 爆发整个过程它们都在硬度强度图的右下方, 与低/硬态一致. 在爆发期间, X射线能谱都由幂律谱主导. 所以推测XTE J1550-564在2001年的迷你爆发可能与MAXI J1659-152以及XTE J1650-500的迷你爆发相似. 它们可能与GRO J0422+32的迷你爆发一样, 由于吸积过程中吸积物质

的质量突然增加产生了迷你爆发.

综上所述, XTE J1550-564在2001年的迷你爆发中, 光度较低、X射线能谱较硬、且一直在低/硬态, X射线辐射主要来自于辐射低效的吸积模型(如: ADAF), 此次迷你爆发可能和GRO J0422+32在1993年8月的爆发类似, 都是由离散的吸积率造成的^[12, 40].

参 考 文 献

- [1] Zhang S N. *FrPhy*, 2013, 8: 630
- [2] McClintock J E, Remillard R A. *Black Hole Binaries*//Lewin W H G, van der Klis M. *Compact Stellar X-Ray Sources*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 157-214
- [3] Remillard R A, McClintock J E. *ARA&A*, 2006, 44: 49
- [4] Tetarenko B E, Sivakoff G R, Heinke C O, et al. *ApJS*, 2016, 222: 15
- [5] Meyer-Hofmeister E, Liu B F, Meyer F. *A&A*, 2005, 432: 181
- [6] Fender R P, Belloni T M, Gallo E. *MNRAS*, 2004, 355: 1105
- [7] Capitanio F, Belloni T, Del Santo M, et al. *MNRAS*, 2009, 398: 1194
- [8] Wu Q W, Gu M F. *ApJ*, 2008, 682: 212
- [9] Qiao E L, Liu B F. *MNRAS*, 2015, 448: 1099
- [10] Cao X W. *MNRAS*, 2009, 394: 207
- [11] Chen W, Shrader C R, Livio M. *ApJ*, 1997, 491: 312
- [12] Sturmer S J, Shrader C R. *ApJ*, 2005, 625: 923
- [13] Brocksopp C, Bandyopadhyay R M, Fender R P. *NewA*, 2004, 9: 249
- [14] Ferrigno C, Bozzo E, Del Santo M, et al. *A&A*, 2012, 537: L7
- [15] Soleri P, Muñoz-Darias T, Motta S, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 1244
- [16] Fürst F, Nowak M A, Tomsick J A, et al. *ApJ*, 2015, 808: 122
- [17] Wang J Y, García J A, Steiner J F, et al. *ApJ*, 2018, 855: 61
- [18] García J A, Tomsick J A, Sridhar N, et al. *ApJ*, 2019, 885: 48
- [19] Coriat M, Corbel S, Prat L, et al. *MNRAS*, 2011, 414: 677
- [20] Prat L, Rodriguez J, Cadolle Bel M, et al. *A&A*, 2009, 494: L21
- [21] Callanan P J, Garcia M R, McClintock J E, et al. *ApJ*, 1995, 441: 786
- [22] Tomsick J A, Kalemci E, Kaaret P. *ApJ*, 2004, 601: 439
- [23] Patruno A, Maitra D, Curran P A, et al. *ApJ*, 2016, 817: 100
- [24] Kuulkers E, Howell S B, van Paradijs J. *ApJ*, 1996, 462: L87
- [25] Yan Z, Yu W. *MNRAS*, 2017, 470: 4298
- [26] Orosz J A, Groot P J, Van Der Klis M, et al. *ApJ*, 2002, 568: 845
- [27] Orosz J A, Steiner J F, McClintock J E, et al. *ApJ*, 2011, 730: 75
- [28] Smith D A. *IAUC*, 1998, 7008: 1
- [29] Sobczak G J, McClintock J E, Remillard R A, et al. *ApJ*, 2000, 544: 993
- [30] Homan J, Wijnands R, Van Der Klis M. *ApJS*, 2001, 132: 377
- [31] Remillard R A, Sobczak G J, Muno M P, et al. *ApJ*, 2002, 564: 962
- [32] Rodriguez J, Corbel S, Tomsick J A. *ApJ*, 2003, 595: 1032
- [33] Belloni T, Colombo A P, Homan J, et al. *A&A*, 2002, 390: 199
- [34] Cao X F, Wu Q W, Dong A J. *ApJ*, 2014, 788: 52
- [35] Tomsick J A, Corbel S, Kaaret P. *ApJ*, 2001, 563: 229
- [36] Tao L, Chen Y P, Güngör C, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 4443
- [37] Dong A J, Wu Q W, Cao X F. *ApJL*, 2014, 787: L20
- [38] Dong A J, Wu Q W. *MNRAS*, 2015, 453: 3447
- [39] Homan J, Fridriksson J K, Jonker P G, et al. *ApJ*, 2013, 775: 9
- [40] Castro-Tirado A J, Ortiz J L, Gallego J. *A&A*, 1997, 322: 507

X-ray Energy Spectra Study of Mini-outburst of XTE J1550–564 in 2001

GE Kang^{1,2} DONG Ai-jun^{1,2} LIU Chang^{1,2} ZHI Qi-jun^{1,2}

(1 School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001)

(2 Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guizhou Normal University, Guiyang 550001)

ABSTRACT The mini-outbursts of the black hole X-ray transients are a kind of outburst with low peak luminosity and short duration. Due to the lack of observational data, the physical mechanism is still unclear. Using data from RXTE (Rossi X-Ray Timing Explorer) satellite from January 28 to March 14, 2001, we studied the X-ray energy spectrum characteristics in the mini-outburst from X-ray transient XTE J1550–564 of the black hole. It was found that the X-ray energy spectrum of XTE J1550–564 in this mini-outburst could be well fitted with a power law spectrum. The evolution of the hardness-intensity diagram throughout the outburst is not a canonical “q-track pattern”, but lies on the far right. In addition, we also analyzed the correlation between X-ray photon index Γ and unabsorbed 2–10 keV X-ray flux $F_{2-10 \text{ keV}}$, and found that there is an anti-correlation between Γ and $F_{2-10 \text{ keV}}$. Meanwhile, the photon index Γ is 1.35 to 1.72. Our results suggest that the outburst in 2001 has been in a low/hard state, its X-ray radiation mainly comes from the low-efficient accretion mode, such as ADAF (Advection-Dominated Accretion Flow).

Key words stars: black holes, X-rays: individual: XTE J1550–564, black hole physics, accretion