

慧眼-HXMT六年银道面扫描巡天的宽X射线能段监测源表*

廖进元^{1†} 关菊¹ 王晨^{1,2}

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 中国高等科学技术中心 北京 100190)

摘要 对慧眼-HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight*-HXMT)的6 yr银道面扫描巡天进行了回顾,重点聚焦于银道面上已知X射线源的监测分析.在慧眼-HXMT在轨运行的前6 yr中,其在1–100 keV的宽能段上共进行了超3000次银道面扫描观测,总观测时长约占慧眼-HXMT观测时间的1/4到1/3.对其中超1300个不同类型X射线源进行了长期流量监测(探测到其中200余个天体的X射线信号),并对监测结果进行了整理分析,包括不同类型天体的活动性以及能谱特征.首先介绍了慧眼-HXMT卫星扫描观测的数据特点和数据分析方法(直接解调成像和光变曲线拟合),然后对慧眼-HXMT扫描巡天监测的结果进行了整体描述,最后展示了慧眼-HXMT监测源性质的统计分析,如空间分布特征、光变活跃度分析和硬度比分析等.

关键词 航天器: 仪器, 方法: 数据分析, X射线: 巡天

中图分类号 P114; **文献标识码**: A

1 引言

硬X射线调制望远镜(慧眼-HXMT, *Insight* Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight*-HXMT)是中国于2017年6月15日发射的第1颗通用型空间天文卫星^[1].银道面扫描巡天是慧眼-HXMT的主要科学任务之一,其总观测时长约占慧眼-HXMT观测时间的1/4到1/3,旨在在宽X射线能段搜索新的瞬变现象并对已知变源进行监测.根据国际上其他X射线望远镜早先的调查,如ROSAT (Roentgen Satellite)、INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)、Swift和MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image),银道面上的大

部分硬X射线辐射源都是可变源,主要是各种类型的X射线双星^[2–3].慧眼-HXMT的窄视场设计及其在探测能段大的有效面积,使其在对弱信号和变源的巡天中具有优势.慧眼-HXMT上有3个主要有效载荷,即,低能X射线望远镜(LE, 0.7–13 keV),中能X射线望远镜(ME, 5–40 keV)和高能X射线望远镜(HE, 20–250 keV).LE由3个探测器机箱组成,每个包含8个探测器模块,共96个SCD (Swept Charge Device)探测器^[4].ME由3个带有Si-PIN探测器阵列的探测器机箱组成^[5].HE由18个NaI (Tl)/CsI (Na)闪烁体探测器组成^[6].它们都是准直型望远镜,主要由相互之间具有60°夹角的3组小视场探测器组成^[1].每个小视场中有一个LE机箱、一个ME机

2024-10-11收到原稿, 2025-01-27收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12333007、12342502),国家资助博士后研究人员计划(GZB20240749),国家重点研发计划(2021YFA0718500),中国科学院国际合作项目(113111KYSB20190020)资助

[†]liaojinyuan@ihep.ac.cn

箱和5个HE探测器. 此外, 大视场探测器也可作为补充用以进行科学数据分析和本底估计^[7]. 由于相对较窄的视场, 小视场探测器在扫描观测中可以获得比大视场探测器更准确的源流量和位置, 所以我们在银道面扫描巡天中仅使用小视场探测器^[8].

慧眼-HXMT在6 yr的银道面扫描巡天中, 完成了对银道面的全面和深度覆盖, 图1展示了低能望远镜的6 yr累积曝光天图和灵敏度天图. 3个望远镜在整个银道面上6 yr最优累积灵敏度分别为 $1.4 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ (LE, 2–6 keV)、 $7.2 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ (ME, 7–40 keV) 以及 $4.7 \times$

$10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ (HE, 25–100 keV). 慧眼-HXMT一共对超1300个不同类型X射线源进行了长期流量监测, 并探测到其中大约200个不同类型天体的X射线信号, 得到了它们在1–100 keV之间多个能段的长期光变曲线. 我们对不同类型天体的长期监测数据进行了活动性以及能谱特征的统计分析^[9–10]. 在本文中, 我们针对慧眼-HXMT扫描巡天的宽X射线能段监测源表对慧眼-HXMT银道面扫描巡天进行了回顾. 在第2节中, 我们介绍数据和分析方法. 在第3节中对宽X射线能段监测源表进行描述. 源表的分析在第4节介绍. 最后在第5节进行总结.

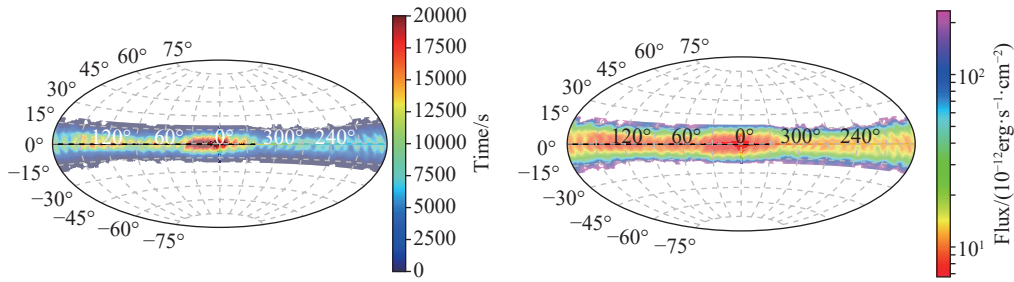


图 1 慧眼-HXMT扫描巡天6 yr曝光天图(左)和累积灵敏度天图(右)

Fig. 1 Exposure sky map (left) and cumulative sensitivity sky map (right) of the *Insight*-HXMT scanning survey over 6 years

2 扫描数据和分析方法

在慧眼-HXMT的银道面扫描巡天中, 整个银河系平面(银经 l 范围: $0^\circ < l < 360^\circ$, 银纬 b 范围: $-10^\circ < b < 10^\circ$)被分成数十个相同半径的区域. 为了完全覆盖整个银河系平面而没有间隙, 在相邻区域之间存在重叠. 由于太阳角度的限制($A_s < 70^\circ$), 每个区域的可见时间约为半年. 对于每个扫描区域, 采用如图2所示的逐行扫描模式进行观测. 有3种扫描速度($v = 0.01^\circ/\text{s}$ 、 $0.03^\circ/\text{s}$ 、 $0.06^\circ/\text{s}$), 10种扫描间隔($d = 0.1^\circ$ 、 0.2° 、 $\dots$ 、 1.0°)以及2种扫描区域半径($R = 7^\circ$ 、 10°)可用于扫描观测. 单个扫描观测的持续时间通常为2–3 h, 具体取决于扫描参数. 对于 $R = 10^\circ$ 、 $v = 0.06^\circ/\text{s}$ 和 $d = 0.8^\circ$ 的扫描观测, 持续时间约为3.3 h.

图3展示了慧眼-HXMT卫星数据分析的处理流程. 我们按照图3所示步骤, 使用慧眼-HXMT的数据分析软件HXMTsoft进行原始数据的基本处

理, 得到本底扣除后的净光变数据. 数据处理的细节可以参考Sai等^[8]和Wang等^[9–10]的工作.

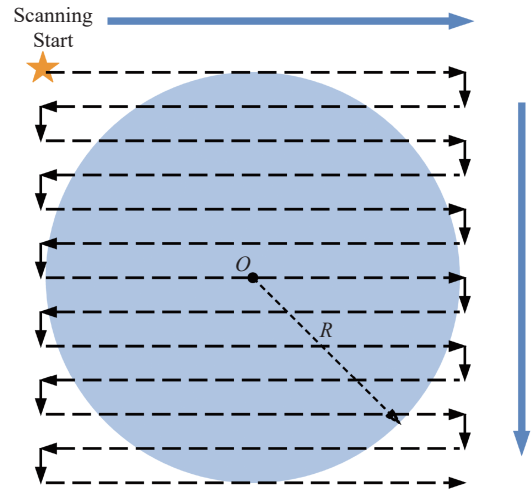


图 2 慧眼-HXMT小天区扫描方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the scanning mode of a small sky area of *Insight*-HXMT

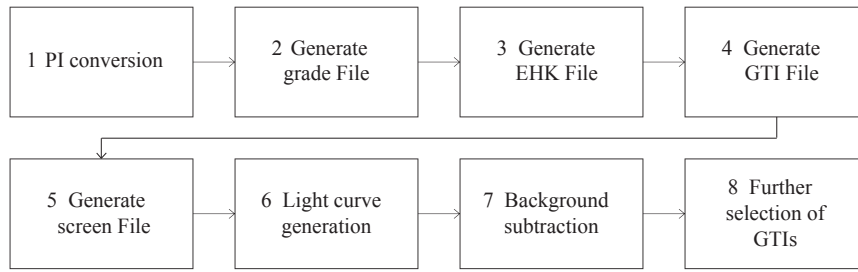


图 3 慧眼-HXMT原始扫描数据的处理流程

Fig. 3 Processing flow of the original scanning data of *Insight*-HXMT

图4展示了LE的一次扫描净光变曲线, 可以看到上面有复杂的调制信号. 当望远镜的视场扫过X射线源, 由于准直型望远镜视场的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)是位置的函数, 因此X射线源会留下调制信号. 有多种方法可以处理调制信号, 不同方法各自具有不同的优势, 但其结果的准确性都依赖于PSF的标定精度. 由于卫星平台和探测器的设计以及卫星发射和在轨运行期间各种因素导致的准直器形变, 慧眼-HXMT各望远镜的PSF并不能简单地由准直器的几何参数决定. 所以我们每年都会对慧眼-HXMT各载荷准直器的平均PSF进行标定. 基本思路是给准直器PSF的几

何模型增加旋转和二维有效面积的修正. 准直器PSF的几何模型, 即视场中位置 (α, β) 处的探测效率 $\mathcal{P}(\alpha, \beta)$, 可由下式表示:

$$\mathcal{P}(\alpha, \beta) = C \times \frac{\left[1 - \frac{\text{abs}(\tan \alpha)}{\tan \alpha_0}\right] \times \left[1 - \frac{\text{abs}(\tan \beta)}{\tan \beta_0}\right]}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}}, \quad (1)$$

其中, α_0 和 β_0 分别是视场长边和短边的范围, C 为视场中心处 $(\alpha = 0, \beta = 0)$ 的探测效率. 慧眼卫星各探测器PSF的细节以及PSF详细的修正过程可参考Nang等人的工作^[11].

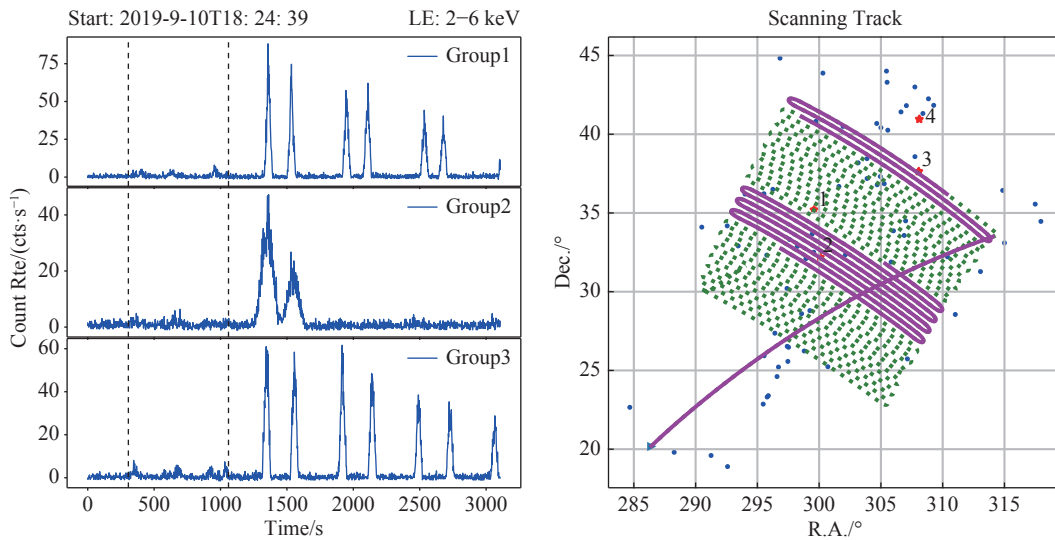


图 4 一个LE扫描光变曲线和对应天区的实例

Fig. 4 An example of an LE scanning light curve and corresponding sky area

在我们的工作中, 主要采用两种方法分析慧眼-HXMT的扫描数据, 即, 直接调制解调成像和

光变曲线PSF拟合. 直接调制解调方法可以对扫描天区进行成像, 结果非常直观; 而光变曲线拟合则

能够给出准确的流量和误差信息. 两种方法结合使用, 确保了慧眼-HXMT扫描数据分析结果的准确性和可靠性. 下面将分别介绍两种方法.

2.1 直接调制解调成像

直接解调方法是我国学者李惕碛和吴枚在上世纪90年代提出一种高分辨率、高精度成像的直接方法^[12-13]. 它通过迭代直接求解描述观测过程的观测方程组, 并在迭代过程中引入物理约束来避免由于观测数据的不完备性和低信噪比造成的病态和振荡, 因此迭代结果既具有直接解调的高空间分辨率, 又具有很好的收敛性和真实的物理意义. 该方法已成功应用到各个X射线天文卫星的图像重建中, 具有很强的成像和解谱能力.

直接解调方法是慧眼-HXMT银道面扫描数据分析采用的主要重建算法之一, 利用其来处理银道面扫描数据可以获得大量天体源的位置和流强信息, 从而实现对天体源的流量监测和发现暂现源. 图5显示直接解调方法对银心附近的重建结果, 其定位精度优于 $8'$ ^[1]. 由于直接解调方法的适用范围是稳定源的图像重建, 通常这个条件能满足, 比如银道面很多变源的爆发时标是星期到月的量级, 相比慧眼-HXMT单次银道面扫描时间(~ 3 h)而言, 这些源在这3 h内可以看成是稳定源, 因此直接解调方法胜任绝大部分银道面扫描数据的处理. 但由于银道面存在更短时标的变源, 比如二型暴爆发时标 ~ 10 s量级, 这时就不能视之为稳定源. 因此需要对直接解调方法进行改进, 使之适用于短时标变源的图像重建. 为此, 我们发展了含时直接解调方法^[14]. 通过对成像方程进行改造, 纳入短时标结构和对它的响应, 得到含时的成像方程, 并通过公式推导得到该含时方程的求解迭代公式. 改进直接解调方法可以给出短时标变源在扫描曝光时间内的准确光变, 并且提高了变源的定位准确度.

利用含时直接解调方法对慧眼-HXMT在快暴源(Rapid Burster) MXB 1730-335发现的二型暴(爆发时间 ~ 10 s, 爆发时间间隔 ~ 30 s)进行重建, 能很好地再现快暴源MXB 1730-335的爆发. 图6(左)给出了其精细的流量监测曲线. 其爆发频率为每分钟2次, 符合文献提及的弛豫振子现象, 即图6(右)展示每个爆发峰的流强和到下一个峰的时间之间服从正相关关系.

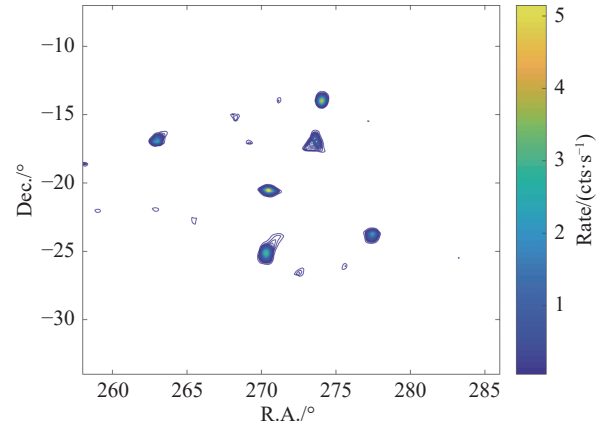


图 5 直接解调方法处理慧眼-HXMT对银心附近观测的重建结果

Fig. 5 Reconstruction result of the direct demodulation method for the Galactic Center observation by Insight-HXMT

含时直接解调方法在短时标变化信号的探测领域有很大的应用前景, 尤其为慧眼卫星探测超亮快速X射线暂现源(Supergiant Fast X-ray Transients, SFXT)提供了强有力的技术支撑. 这类暂现源的典型爆发时标只有数小时, 光变曲线呈现快上升、慢下降的特征, 流量变化幅度可达宁静态的 $10^3 - 10^4$ 倍. 基于蒙特卡洛, 我们模拟了慧眼对一个SFXT的观测, 然后利用含时直接解调方法对模拟数据进行重建. 图7所示的重建结果清晰再现了SFXT快上升、慢下降的爆发特征, 重建流强参数指标和输入吻合, 同时提升定位精度, 此模拟示例中的定位精度为 $0.6'$. 目前已经发现的超巨星快X射线暂现源只有十几个, 爆发机制尚不明确. 大约有3种模型来解释SFXT这种罕见的耀变: 星风的成团成块、伴星的偏心轨道运动和吸积选择机制的转换^[15-16]. 若慧眼对银道面扫描能发现更多的SFXT, 则其可以为理论模型提供观测线索和检验证据.

2.2 光变曲线PSF拟合

在慧眼-HXMT的扫描数据分析中, 采用PSF模型直接拟合不同视场光变曲线的方式得到扫描源的位置和流量信息, 整体流程如图8所示. 在进行PSF拟合的过程中, 首先根据有效面积找到视场覆盖的源, 继而对这些源的流量信息进行拟合. 为

了提高拟合的效率和准确程度, 我们首先对这些源的流量进行了强弱区分, 将强源定义为流量高于卫星灵敏度(能对光变产生较明显贡献)的源, 反之则为弱源. 然后对所有强源进行联合拟合, 得到每一个强源的流量信息. 完成强源拟合后, 利用残

差进行新源候选体的搜寻工作, 这一步是为了找出可能存在但尚未确认的源. 最后, 对所有进入视场的弱源采取单个PSF模型拟合的策略, 以确保在拟合过程中不会产生耦合以及大量计算资源浪费的现象.

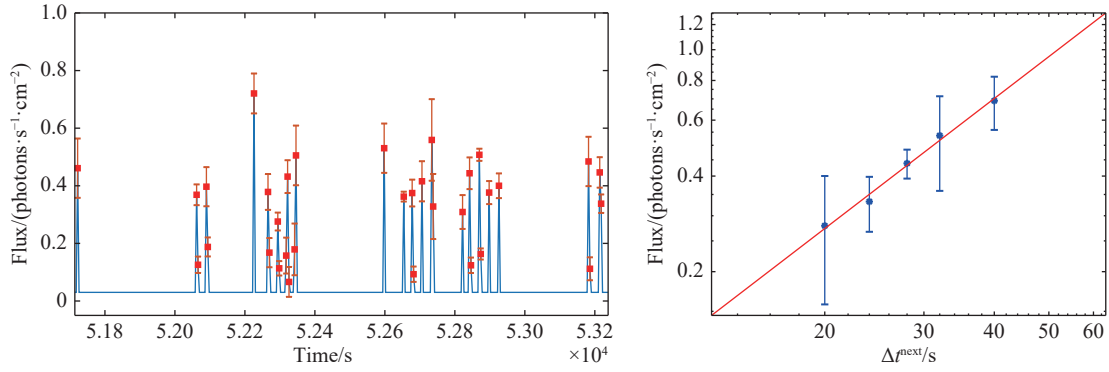


图 6 改进的直接解调方法对MXB 1730-335所在天区的重建结果. 左: 流量监测曲线; 右: 暴流量和暴间隔时间的关系.

图片取自Guan等人的文章^[14].

Fig. 6 Reconstruction result of the improved direct demodulation method for the MXB 1730-335 region. Left: monitoring light curve; right: relationship between burst fluence and waiting time to the next burst. Reproduced from Guan et al.^[14].

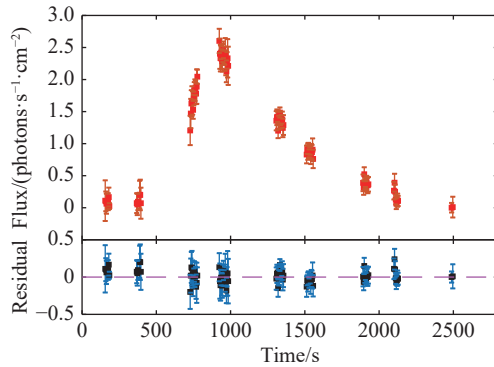


图 7 模拟慧眼-HXMT对SFXT的观测情况.

图片取自Guan等人的文章^[14].

Fig. 7 Simulation of the SFXT observation by *Insight-HXMT*. Reproduced from Guan et al.^[14].

按照上述流程, 对每次扫描数据进行PSF拟合后, 我们会对结果展开全面的分析, 包括检查拟合的情况、确定是否出现已知源的爆发事件以及是否有新源候选体出现. 图9展示了一次慧眼-HXMT扫描数据分析实例. 图9 (a)中的3条蓝色光变曲线分别代表3个机箱在好时间段内扣除本底后的光变

情况, 红色曲线代表了最终的拟合结果. 为了进一步评估拟合的质量, 每条蓝色曲线下方都有相应的灰色线表示残差, 用于展示拟合结果与观测数据之间的差异. 图9 (b)给出了与之对应的卫星扫描轨迹图, 其中紫色线代表了好时间段内的卫星轨迹, 蓝色散点表示此次扫描视场经过的弱源, 而红色五角星则代表本次观测中的强源, 每个强源都配有序号标记.

3 巡天结果概述

慧眼-HXMT在6 yr的银道面扫描巡天中, 共进行了超3000次扫描观测, 取得了大量的扫描观测数据. 按照第2节所述处理流程, 每次扫描数据会进行直接解调成像和光变曲线拟合, 从而得到扫描源的位置和流量信息. 慧眼-HXMT在1-6 keV、7-40 keV和25-100 keV分别监测到1336、957、935个已知源. 我们将监测结果汇总产生监测源表, 源表主要包括各个能段的以下信息: (1)源的名字、(2)源的坐标、(3)源的类型、(4)源的流量和误差、(5)变化程度和误差、(6)硬度比和误

差. 在所有的监测源中, 有223个源在2–100 keV探测到信噪比 S/N 大于5的信号, 33个源在3个载荷均探测到明显信号. 图10展示了慧眼-HXMT扫描监测源在银道坐标中的位置. 通过对每次扫描观测中所有监测源的信噪比与流量关系进行统计分析,

可以估计出慧眼-HXMT单次扫描的极限灵敏度; 而扫描的系统误差可以通过Crab长期光变的涨落进行估计^[8, 11]. 慧眼-HXMT在不同能段的探测结果与探测器的性质列于表1.

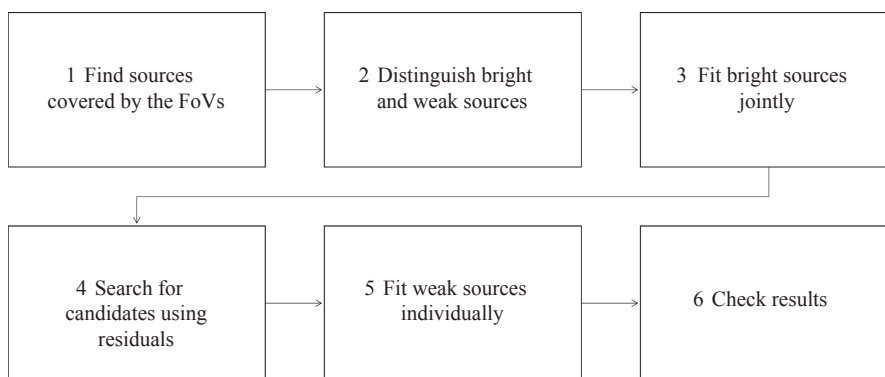


图 8 光变PSF拟合流程

Fig. 8 Processing flow of the light curve PSF fitting

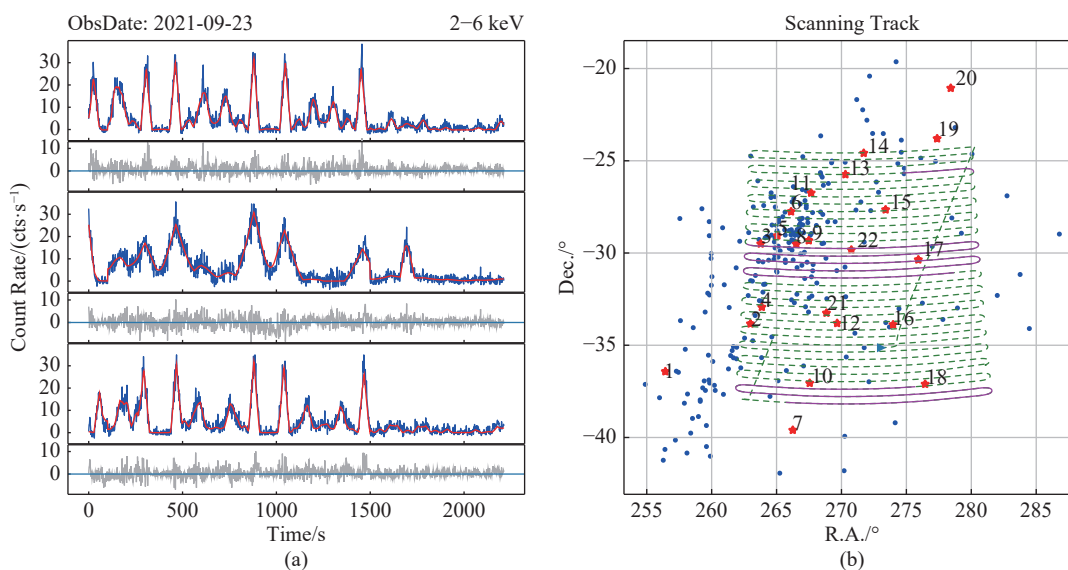


图 9 慧眼-HXMT/LE扫描光变曲线拟合和对应天区实例

Fig. 9 An example of an LE scanning light curve fitting and the corresponding sky area of *Insight*-HXMT

4 监测源表基本分析

本节主要基于Wang等人对慧眼-HXMT前4 yr扫描结果的统计分析工作^[9–10], 对慧眼-HXMT监测源表中的223个亮源的监测结果进行多个维度的

统计展示, 主要聚焦于不同类型天体的活跃度、活跃特征、能谱特征以及空间分布.

4.1 监测源表中亮源的活跃程度

各种X射线源在不同能段的长期监测曲线是

慧眼-HXMT的重要科学产出之一, 不同类型的源在长期光变上呈现出不同的活跃程度, 我们用 F_{rms} 来量化它们的变化程度^[17], 公式如下:

$$F_{\text{rms}} = \frac{S^2 - \bar{\sigma}^2}{\bar{f}^2}, \quad (2)$$

其中,

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i (f_i - \bar{f})^2, \quad (3)$$

此处 $\bar{f}$ 是长期流量的平均值, $\bar{\sigma}^2$ 表示长期流量的 1σ 误差平方的平均值, f_i 表示源在第 i 次扫描的最优拟合流量, N 是扫描监测数据点个数. F_{rms} 值越大, 表示源在监测期间流量的变化程度越大. F_{rms} 的误差可由下式进行计算:

$$dF_{\text{rms}} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{N}} \times \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{f}^2} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\bar{\sigma}^2}{N}} \times \frac{2\sqrt{F_{\text{rms}}}}{\bar{f}} \right)^2}. \quad (4)$$

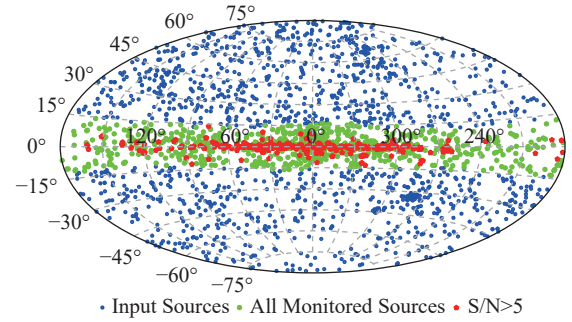


图 10 慧眼-HXMT扫描巡天监测源(2–6 keV)在银道坐标的位置. 蓝色数据点为Swift、MAXI和INTEGRAL联合源表中已知源的位置, 绿色点代表慧眼-HXMT在2–6 keV监测到的源, 红色点为6 yr平均信噪比大于5的亮源.

Fig. 10 Position of sources in the Galactic coordinates monitored by *Insight*-HXMT scanning survey (2–6 keV). The blue points are the sources in the combined catalog of Swift, MAXI and INTEGRAL. The green points are the monitoring sources in 2–6 keV by *Insight*-HXMT, and the red points are those with $S/N > 5$.

表 1 慧眼-HXMT在不同能段的主要扫描结果

Table 1 Main scanning results of *Insight*-HXMT in different energy bands

Energy/keV	LE				ME		HE
	1 – 2	2 – 4	4 – 6	5 – 7	1 – 6	7 – 40	25 – 100
Systematic error (%)	2.16	3.35	2.61	3.49	3.46	1.42	0.83
Number of monitored sources ^a	1340	1363	1363	1363	1363	957	935
Number of bright sources ^b	284	365	292	277	270	65	59
Sensitivity/mCrab ^c	4.7	4.6	13.2	21.2	2.5	17.6	12.7

^a The total source number that has been covered at each energy band.

^b The number of the sources with Ave. $S/N > 5$ at each energy band.

^c Sensitivity of single scanning observation (~ 2.3 h).

当一个源的 $F_{\text{rms}} - dF_{\text{rms}}$ 小于或等于 Crab 在相应能段的 F_{rms} 时, 这个源被定义为在相应能段是流量稳定源, 否则是一个变源. 图11展示了223个源的 F_{rms} 的分布柱形图, 横纵坐标分别是 F_{rms} 的值和源的数量, 每一个子图代表不同的能段. 每种类型的源的 F_{rms} 中值(标注在了每个子图上)被用来代指整体的趋势. 从图中可以看出, 大质量X射线双星(High-Mass X-ray Binary, HMXB)的流量在任意能段均比小质量X射线双星(Low-Mass X-ray

Binary, LMXB)的流量更活跃, 在2–6 keV和7–40 keV, 黑洞双星(Black Hole Binary, BHB)的流量比中子星双星(Neutron Star Binary, NSB)的变化更大. 此外, LMXB、NSB和BHB的 F_{rms} 随着能段的增加有下降的趋势. 超新星遗迹(Supernova Remnant, SNR), 孤立脉冲星和Seyfert 1星系的流量比X射线双星的更稳定. 但在这3种类型中, 一些源也具有较大的 F_{rms} , 这可能是其平均流量较低造成的.

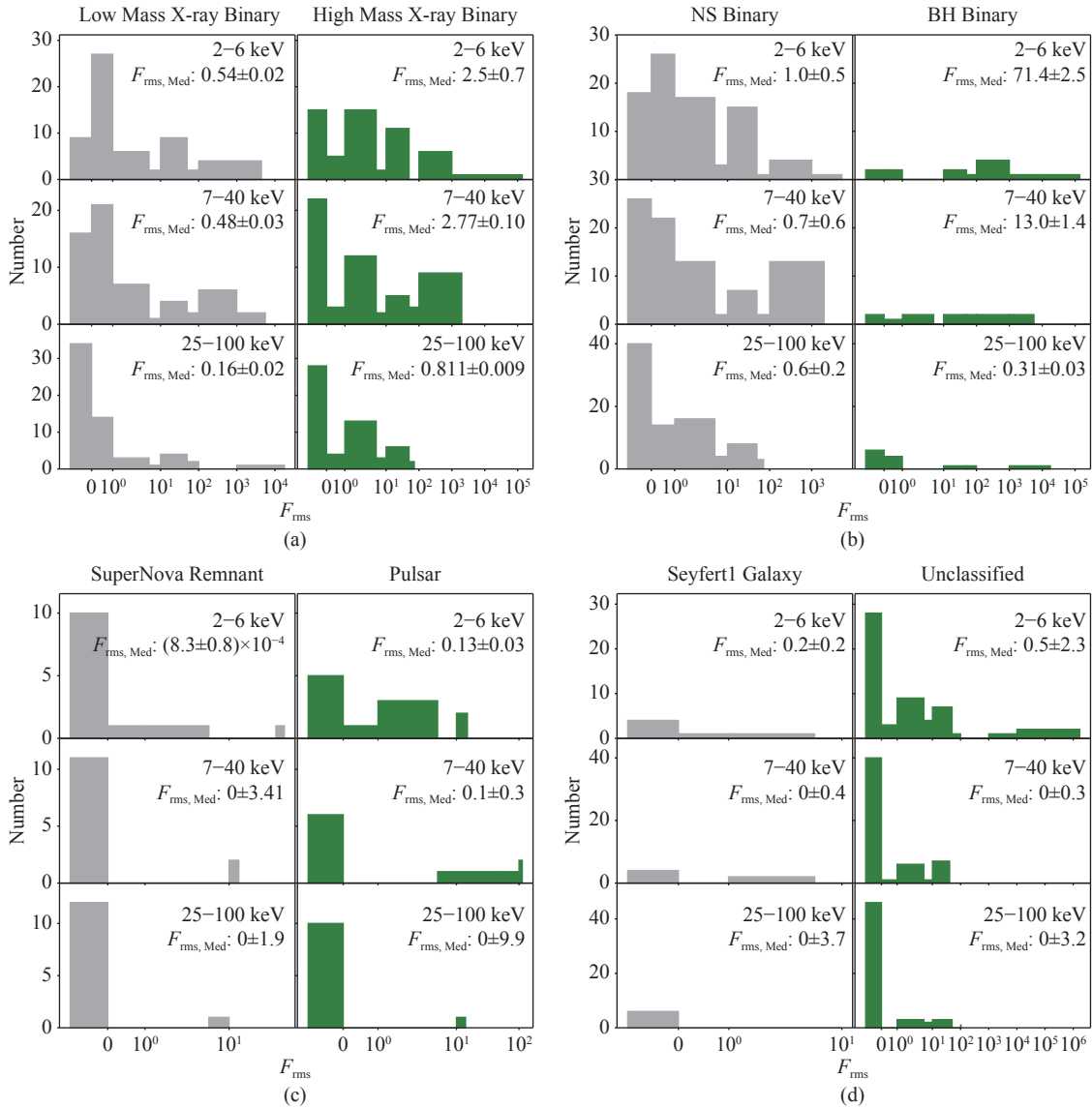


图 11 亮源在2–100 keV能段的 F_{rms} 分布. 图片改自Wang等人的文章^[9].

Fig. 11 F_{rms} distribution of bright sources in 2–100 keV energy band. Figure adapted from Wang et al.^[9].

4.2 监测源表中不同类型的双星系统的 F_{rms} 特点

我们分析了32个在3个探测器均探测到信号的X射线双星的流量变化情况. 图12展示了这些源的 F_{rms} 在3个能段的分布情况. 如图12 (a)所示, 15个中子星低质量X射线双星(Neutron Star Low-Mass X-ray Binaries, NS-LMXBs)在2–6 keV的 F_{rms} 值低于7–40 keV或25–100 keV的 F_{rms} 值; 在图12 (c)

中可以看到, LMXB的 F_{rms} 中位数随着能段增加而逐渐增加. 这与Mitsuda等人1984年的研究所述相一致^[18]. NS-LMXB的能谱由光学厚吸积盘的多温黑体谱和中子星表面的黑体谱组成, 前者稳定辐射而后者辐射呈现活跃的变化. 然而, HMXB在3个能段的 F_{rms} 变化呈现出以下特点: (1)与LMXB相比, HMXB在3个能段的流量变化更加活跃; (2) NS-LMXB在每个能段的 F_{rms} 都低于NS-

HMXB, BH LMXB在每个能段的 F_{rms} 都低于BH HMXB; (3)随着能段增加, NS-HXMB的 F_{rms} 表现出先增大后减小的趋势. 这些变化可能与选择的能段有关, 但也可能与HMXB的吸积过程相关. 根

据伴星的不同, HMXBs可以分为3个子类: (a) Be/X射线双星; (b)超巨型X射线双星; (c)超巨型快速X射线瞬变体. 由于不同子类的伴星吸积物质的方式有所差异, 这也可能导致更多样化的爆发情况.

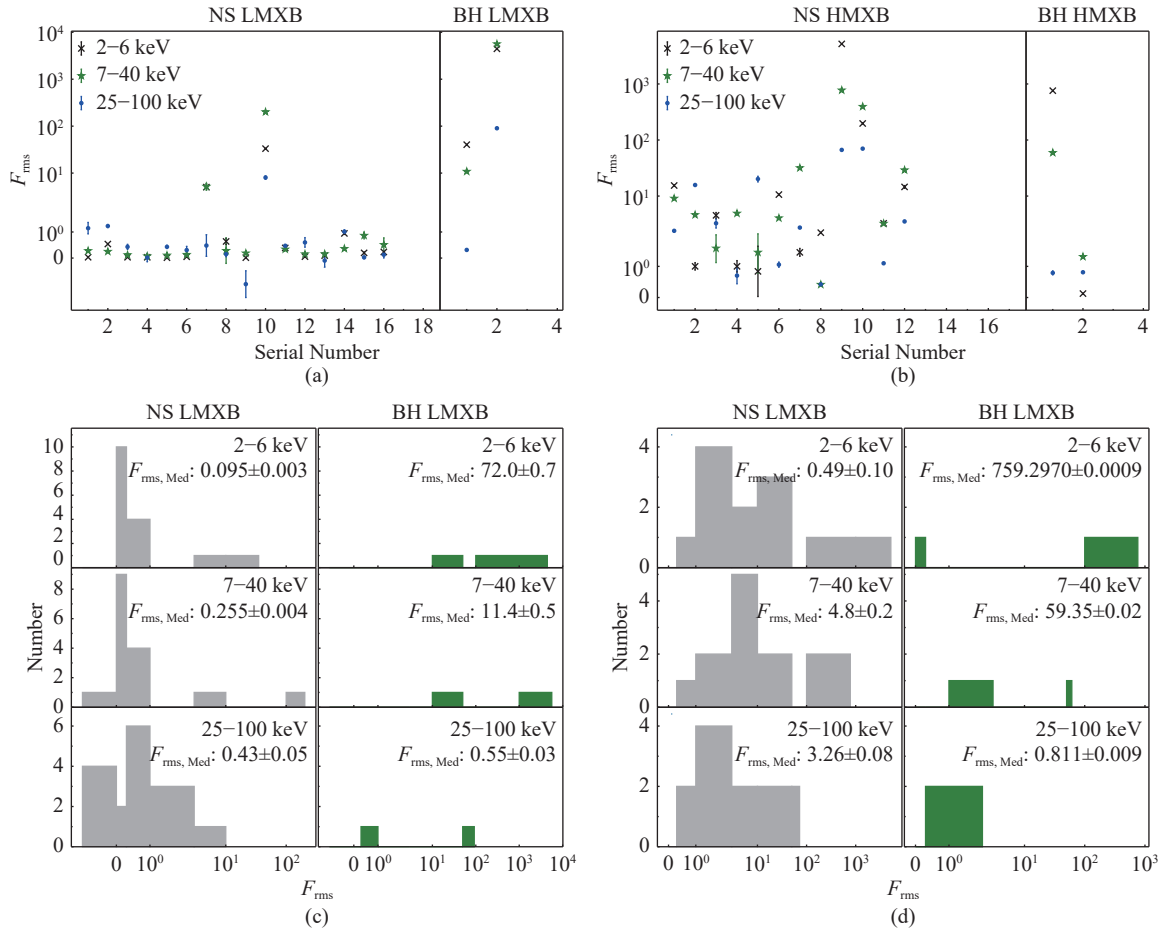


图 12 在2-6 keV、7-40 keV和25-100 keV信噪比均大于5的32个亮源的 F_{rms} 的分布. 图片改自Wang等人的文章^[9].

Fig. 12 F_{rms} distribution of 32 bright sources with S/N > 5 in 2-6 keV, 7-40 keV, and 25-100 keV energy bands.

Figure adapted from Wang et al.^[9].

4.3 亮源活动程度与流量、能谱、空间分布的关系

我们对源表中的亮源在不同高低能段组合下的硬度比(HR)进行了计算和分析. HR可以被定义为高能段和低能段流量的比值, 由于不同的辐射机制会产生不同能段的辐射光子, HR经常被用来反映X射线源的能谱特征. 在这项工作中, 我们首先根据亮源的流量稳定性将其分为流量稳定

(F_s)和流量活跃(F_v)两组, 再根据能谱的稳定性将其进一步分为能谱稳定(S_s)和能谱活跃(S_v)两组. 于是, 所有亮源最终被划分为3组活跃程度: $F_v \& S_v$, $F_v \& S_s$ 和 $F_s \& S_s$ 源. 表2展示了不同高低能段组合下3组活跃程度的源的个数. 判断流量的稳定性时, 若源的 F_{rms} 的1- σ 下限大于Crab的 F_{rms} , 则流量视为活跃, 否则视为稳定. 判断能谱稳定性时, 则是与Crab的长期HR稳定程度进行比较, 在

这里使用了标准卡方检验.

当一个源的卡方大于相应自由度水平下的极限时会被认为其在目标能段的能谱是活跃的, 反之则为能谱稳定的. 这个极限便是利用相应高低能段的Crab长期HR的卡方得到. 图13展示了Crab、Cen X-3和Cyg X-1的长期光变和HR, Crab长期HR的自由度和卡方分别为78和77.3, 对应的显著性水平是0.5, 因此0.5便被用来确定其他亮源在这

两个能段的流量活跃程度. Cen X-3和Cyg X-1的自由度分别是64和146, 这两个自由度下0.5的显著性水平所对应的卡方分别是63.3和145.3, 计算可得实际的长期HR的卡方为38.3和17808.6. 很显然, Cen X-3是 S_s 源, 而Cyg X-1是 S_v 源. 按照这样的方法, 我们对各个不同能段组合下的亮源的能谱和流量活跃程度进行了计算, 每种活跃程度的源的个数如表3所示.

表 2 各个高低能段组合下不同流量和能谱变化程度的源的个数
Table 2 The number of sources with different flux and spectral variability in various combinations of hard and soft bands

H ^a /keV	S ^b : 1–2 keV			S: 2–4 keV			S: 3–5 keV			S: 5–7 keV			S: 2–6 keV		
	$F_v \& S_v$	$F_v \& S_s$	$F_s \& S_s$	$F_v \& S_v$	$F_v \& S_s$	$F_s \& S_s$	$F_v \& S_v$	$F_v \& S_s$	$F_s \& S_s$	$F_v \& S_v$	$F_v \& S_s$	$F_s \& S_s$	$F_v \& S_v$	$F_v \& S_s$	$F_s \& S_s$
2–4	57	25	54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4–6	45	35	48	63	49	61	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5–7	40	34	49	54	45	49	45	56	70	—	—	—	—	—	—
7–40	31	3	2	36	8	2	38	7	2	35	11	1	38	8	2
25–100	16	9	3	30	6	4	28	8	2	23	11	2	30	7	4

^a High energy band.

^b Low energy band.

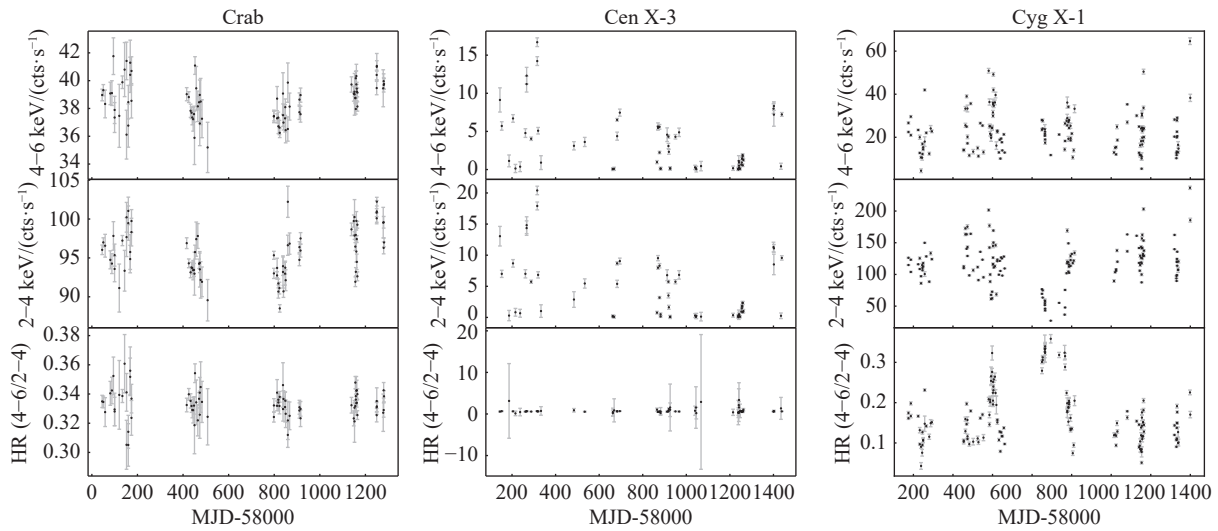


图 13 Crab、Cen X-3和Cyg X-1的长期光变和硬度比. 每个子图从上到下分别为4–6、2–4 keV的长期光变以及4–6/2–4 keV的HR.
图片改自Wang等人的文章^[10].

Fig. 13 Long-term light curves and HR of Crab, Cen X-3, and Cyg X-1. Each panel shows the light curve in 4–6 and 2–4 keV, as well as HR (4–6/2–4 keV) from top to bottom. Figure adapted from Wang et al.^[10].

不同活跃程度的源在空间上具有不同的分布. 图14展示了 $F_V \& S_S$ 、 $F_V \& S_V$ 和 $F_S \& S_S$ 源沿银经和银纬的分布情况. 每个子图分为上下两部分: 上部显示所有源的整体分布, 下部分阴影区突出了每种活跃程度源总量68%的集中范围(分别以上下标表示), 其宽度代表银经或银纬的跨度, 高度对

应源的数量, 具体的数值标记在了图片的空白处. 可以看到不同活跃程度的源呈现出不同的聚集趋势, $F_S \& S_S$ 源主要聚集在 $19^\circ < l < 42^\circ$ 的范围内, $F_V \& S_V$ 源则集中在 $-20^\circ < l < 9^\circ$ 的区域, 相比之下 $F_V \& S_S$ 源的分布则更加分散.

表 3 2–4 keV低能段与不同高能段组合下的LMXB和HMXB的数量
Table 3 The number of LMXBs and HMXBs in various combinations of soft (2–4 keV) and hard bands

H band	LMXB				HMXB			
	All	$F_V \& S_V$	$F_V \& S_S$	$F_S \& S_S$	All	$F_V \& S_V$	$F_V \& S_S$	$F_S \& S_S$
4–6 keV	50	30	16	4	40	17	11	12
5–7 keV	44	28	15	1	41	16	10	15
7–40 keV	29	25	3	1	14	11	3	0
25–100 keV	21	17	3	1	16	12	3	1

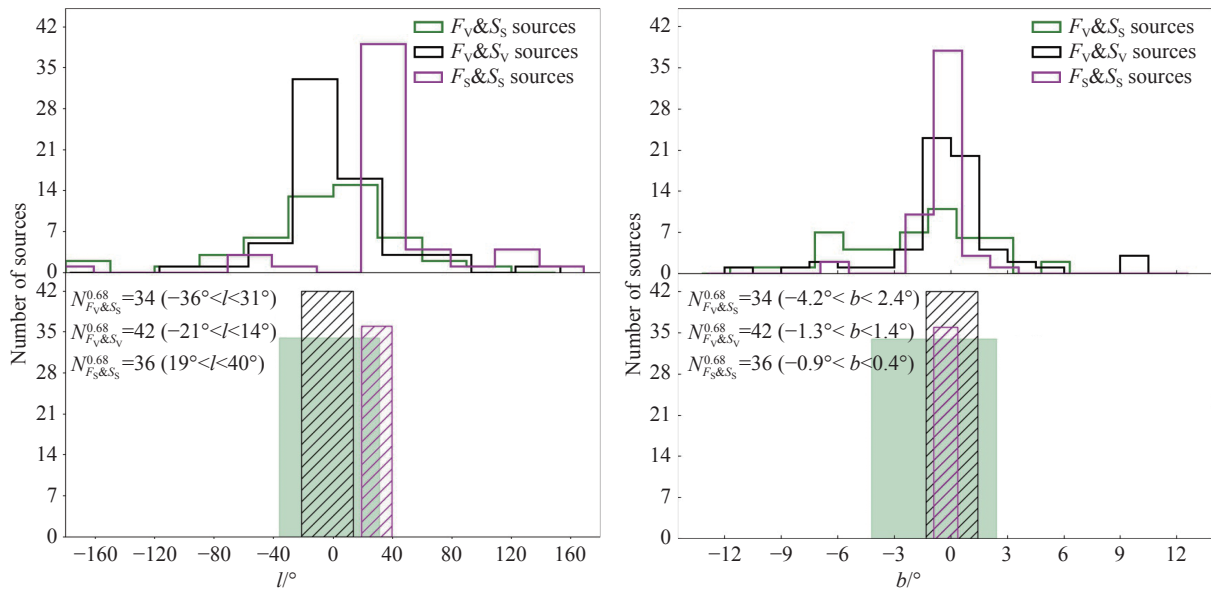


图 14 3种不同活跃度的X射线源随银经(左)和银纬(右)的分布. 绿色、黑色和紫色线分别代表了 $F_V \& S_S$ 、 $F_V \& S_V$ 和 $F_S \& S_S$ 源.

图片改自Wang等人的文章^[10].

Fig. 14 Distribution of X-ray sources with three different levels of activity as a function of Galactic longitude (left) and latitude (right). The green, black, and purple lines represent the $F_V \& S_S$, $F_V \& S_V$ and $F_S \& S_S$ sources, respectively.

Figure adapted from Wang et al.^[10].

4.4 双星系统的HR的整体分布特点

在慧眼-HXMT银道面扫描巡天过程中, 监测到的亮源以X射线双星(X-Ray Binary, XRB)系统为主, 于是首先对XRB的HR的整体特点进行了分

析. 在XRB中, 可以根据主星或伴星的质量、演化阶段等情况将其更细致地分为很多子类. 在本节内容中, 我们首先研究LMXB和HMXB的HR的整体特点. 首先将低能段固定在2–4 keV, 然后依次

选择4–6、5–7、7–40和25–100 keV做为高能段, 分别计算这些高能段和低能段组合下的HR, 并且使用HR的中值来表征其整体变化趋势. 如表3所示, 大部分双星系统的流量都是活跃的.

图15展示了这些源的HR和数量之间的关系, 其中(a)–(d) 4个子图分别代表所有源、 $F_V \& S_V$ 、

$F_V \& S_S$ 和 $F_S \& S_S$ 源. 低能段选用2–4 keV不变, 每种颜色对应着不同的高能段(图注所示), 垂直虚线表示中值的位置. 通过比较代表中值的垂直虚线的位置可以看到, 每个子图中HMXB的HR的分布均比LMXB的更靠右, 意味着HMXB的能谱是比LMXB更硬的. 综合图15所包含的信息, 可以看到:

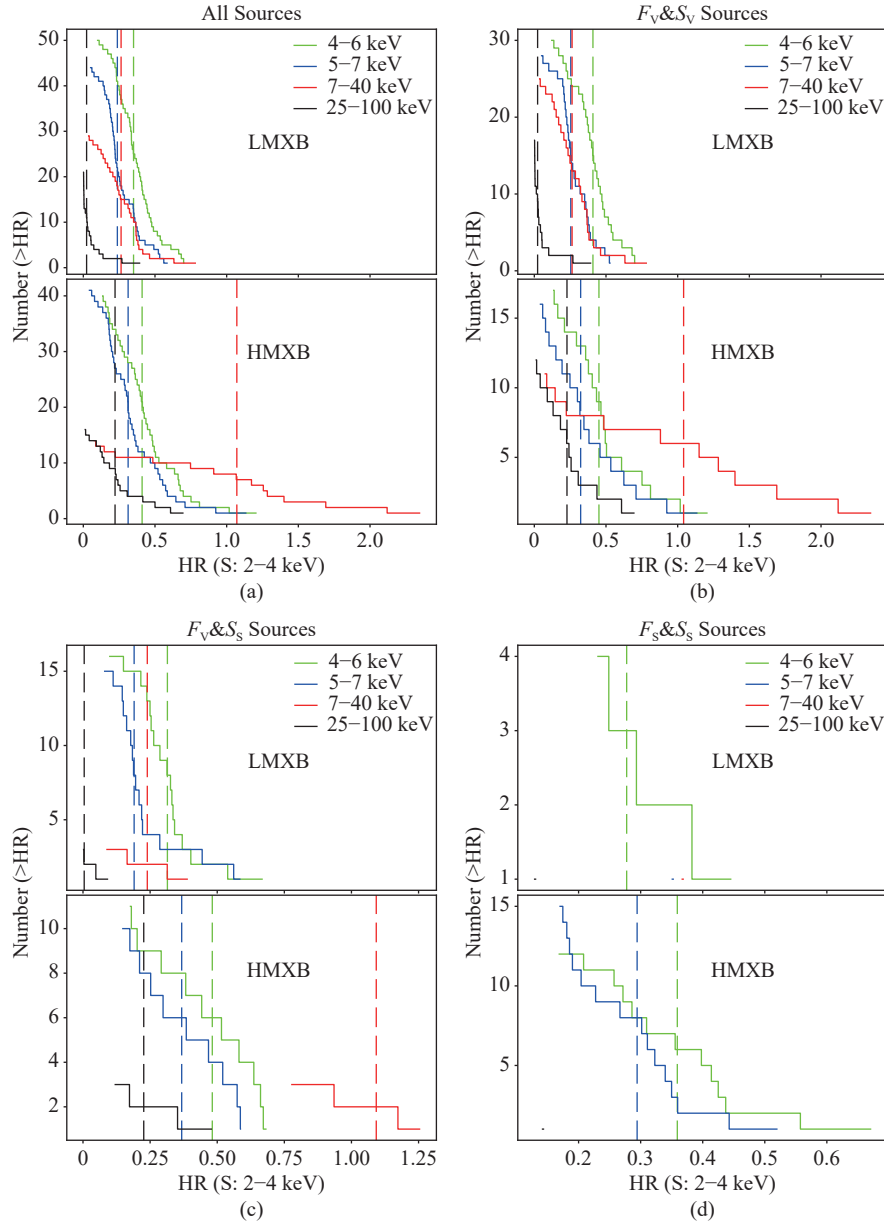


图 15 不同流量和能谱活跃程度的源的HR与累计数目的关系. 图片改自Wang等人的文章^[10].

Fig. 15 Relationship between HR and cumulative numbers of sources with different flux and spectral activity levels. Figure adapted from Wang et al.^[10].

1.在这几种高低能段组合下, HMXB的HR整体始终是高于LMXB的. 并且这个趋势在所有源、 F_V & S_V 和 F_V & S_S 源中均有体现. 由于流量稳定的XRB数量相对较少, 有的能段甚至没有或仅有1个, F_S & S_S 难以纳入比较.

2.在LMXB中, F_V & S_V 源的能谱整体上比 F_V & S_S 源更硬, 而在HMXB中这个规律在7 keV以下是相反的. 其中HMXB的HR整体高于LMXB, 意味着HMXB的能谱更硬, 这与Fabbiano^[19]的结论是一致的. 我们认为这与不同的磁场强度对吸积物质的调制作用有关:

1.吸积的中子星系统中, HMXB通常比LMXB更年轻, 相对较短的吸积时间使得它们保留了更多的原初磁场, 因此NS-HXMB的表面磁场强度普遍高于LMXB;

2.处于强磁场环境中时, 主星从伴星处吸积来的带电粒子会受到非常强的调制作用, 进而被拽向主星的磁极处形成吸积柱. 这个吸积柱内存在着高温、高压、强磁场等各种极端环境, 会发生一系列的热辐射与非热辐射过程;

3.在弱磁场的吸积双星系统中, 磁场的调制作用降低, 难以支撑磁极处的吸积柱形成, 这时吸积的物质会被拉入一个圆形轨道, 形成开普勒圆盘, 这时产生的X射线辐射主要由吸积盘与中子星表面的热辐射组成^[20].

综上所述, 在吸积的中子星系统中, HMXB的能谱通常整体会比LMXB的更硬. 值得说明的是, 在LMXB与HMXB中, 也有一部分是BHB系统, 但是由于BHB在双星系统中的占比很少^[21], 对整体的分布趋势影响不大, 因此我们在这里忽略了它的影响.

4.5 不同类型亮源在2–7 keV的HR分布

在2–7 keV监测到的亮源中, 除诸多已知类型的源以外还存在很多目前未明确分类的源. 我们对亮源5–7/3–5 keV和4–6/2–4 keV的硬度比(HR1 & HR2)的分布情况进行了分析. 除研究已知类型的源的特点外, 还试图从中探寻未分类源的可能类型. 在目标能段的亮源一共有142个,

其中7类源的样本量很小, 难以纳入统计分析中, 于是我们将它们剔除掉. 这7类源分别为: 激变变星(IGR J18308–1232, SS Cyg)、Seyfert 2星系(IGR J16024–6107)、射电源(AX J1841.3–0455)、双或多星系统(AX J1847.6–0156)、星系团(Oph Cluter)以及Be星(gam Cas). 剩下的135个源除去未分类源以外包括以下类型: HMXB、LMXB、SNR、Pulsar和Seyfert 1星系. 图16–17展示了这些源的HR1和HR2的分布情况, 不同的颜色代表不同类型的源.

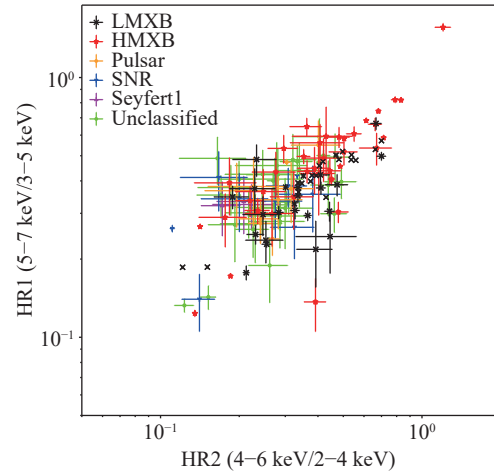


图 16 135个亮源的HR1和HR2的关系.

图片改编自Wang等人的文章^[10].

Fig. 16 Relationship between HR1 and HR2 for 135 bright sources. Figure adapted from Wang et al.^[10].

图17中每个子图代表一种类型的源, 虚线代表中值(HR_{Med})的位置, 具体数值也展示在每个子图的空白处. 通过使用中值来表征整体趋势可以发现HMXB的HR1和HR2在这些类型中均是最大的. 我们计算了不同类型源HR1和HR2之间的相关性, 结果分别是0.62 (LMXB)、0.93 (HMXB)、0.66 (Pulsar)、0.69 (SNR)、0.48 (Seyfert 1)和0.59 (未知类). 这表明不同类型源HR1和HR2之间的相关性可能不同. 值得注意的是, 相关系数在这里其实并没有太多物理意义, 但是却可以用来大致估计未分类的源和哪种类型的源更像. 通过相关系数以及柱形图可以发现:

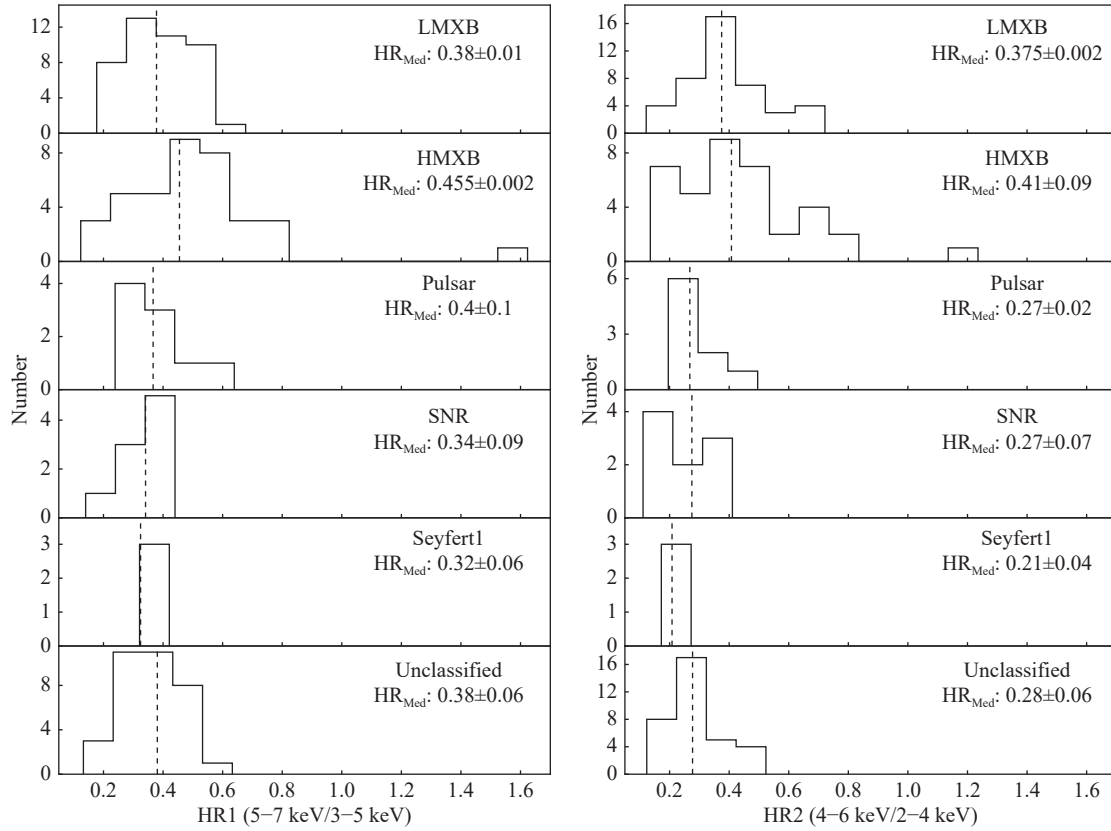


图 17 图16中135个亮源HR的分布. 图片改编自Wang等人的文章^[10].

Fig. 17 Distribution of hardness ratios of the 135 bright sources shown in Figure 16. Figure adapted from Wang et al.^[10].

1. LMXB的HR1相对均匀地分布在0.2到0.6的范围内, 而HR2则出现集中于0.4附近的趋势;

2. HMXB的HR在这些类型中分布范围是最宽的, 整体也是最硬的;

3. 未分类源的HR分布范围与LMXB较为接近, 其相关系数与LMXB最接近. 从整体分布趋势上也可以看到, 有从相对均匀向某一个值靠拢的趋势. 因此单纯从分布情况来看, 可以推测有可能在未分类源中LMXB占比较多.

图18–19展示了双星系统HR1和HR2的分布情况. 在这些双星系统中, 大部分主星是有明确分类的, 但也有一些主星分类不明确(图示中的‘?’). 从主星类型已知双星系统的HR分布情况可以看到, NS-HMXB的HR明显高于NS-LMXB, NS-LMXB的HR又高于所有的BHB. 在BHB中, 主星被认为

不存在固体表面^[22], 因此在其宁静态的时候, 辐射由盘上的热成分主导, 其能谱相较于NSB会更软. 当它进入爆发态之后, 会呈现出丰富的能谱变化过程, 这时当来自喷流、冕等区域的非热辐射占主导时, 能谱会很硬. BHB处于爆发态时间占比较小, 因此整体呈现出比较软的能谱特点. 此外, 我们还可以通过图18–19来推测几个主星类型不明的XRB的可能类型, 首先, ‘LMXB/?’的HR所在的位置均是NS-LMXB分布峰值处, 比BH-LMXB的HR中值大; 其次, ‘HMXB/?’的HR均是明显高于BH-HMXB, 而在图19 (b)中有几个‘HMXB/?’的HR在BH-HMXB附近. 因此可以推测LMXB中主星不明确的一个源是NS-LMXB的可能性比较大, 而在HMXB中不排除有部分源是BH系统的可能, 但NS-HMXB的占比可能更多.

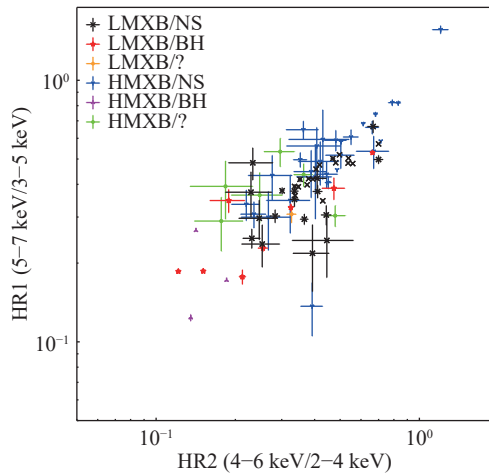
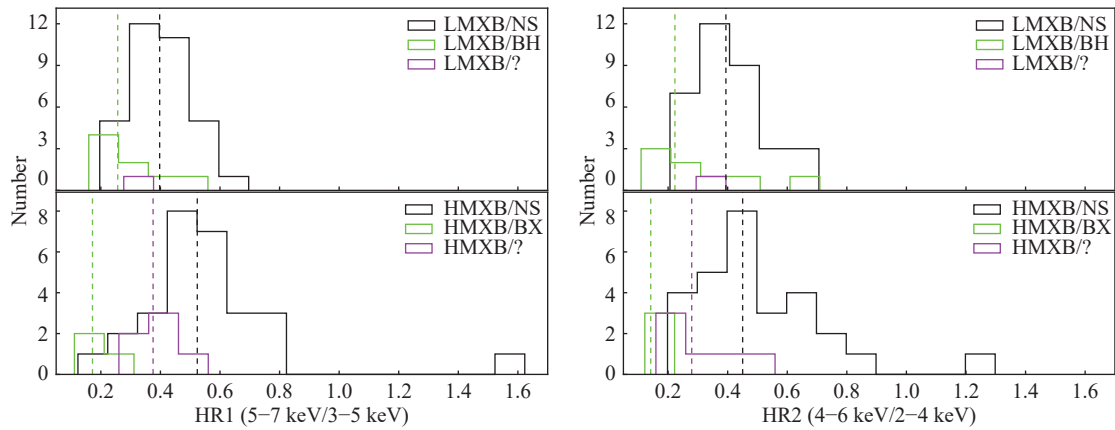


图 18 不同类型的双星系统的HR1和HR2的关系。

图片改编自Wang等人的文章^[10]。Fig. 18 Relationship between HR1 and HR2 for different types of binary systems. Figure adapted from Wang et al.^[10].图 19 图18中不同类型的XRB的HR分布. 图片改编自Wang等人的文章^[10]。Fig. 19 HR distribution of different types of XRBs shown in Figure 18. Figure adapted from Wang et al.^[10].

4.6 暂现XRB在低流量态与爆发态之间的HR

我们对前4 yr监测到剧烈爆发的7个暂现源的HR进行了分析, 对比它们在爆发态和低流量态的区别. 此处, 当单次扫描的流量的 3σ 下限高于探测器灵敏度的便认为是进入了爆发态, 否则认为它是低流量态. 表4为这7个源的基本信息(序号、名称、位置、类型、爆发态和低流量态的平均HR). 图20为这两种态下的平均HR的分布情况, 中间的虚线代表低流量态的平均硬度比等于爆发期间平均硬度比, 每个数据点的误差棒分别代表两种状态下HR平均值的误差, 由于在低流量态的流量比较低, 相应的HR的误差较大. 从表4和图20中可以看到:

1. 3个黑洞双星系统GX 339-4、MAXI J1820+070和MAXI J1348-630在低流量状态下的平均HR下限比爆发状态下更大. 这与常用来描述BHB态转变的HID图中的q形轨迹所表征的情况是一致的.

表 4 7个暂现XRB的信息

Table 4 The information of seven transient XRBs

Number #	Source Name	R.A./°	Decl./°	Source Type	Ave.HR (outburst)	Ave.HR (low flux)
					5-7/3-5 keV	5-7/3-5 keV
1	GX 339-4	255.71	-48.79	(BH) HMXB	0.123 ± 0.004	0.25 ± 0.11
2	MAXI J1820+070	275.09	7.19	(BH) LMXB	0.186 ± 0.002	0.51 ± 0.15
3	MAXI J1348-630	207.05	-63.27	(BH) LMXB	0.186 ± 0.002	0.35 ± 0.13

表4 续
Table 4 Continued

Number #	Source Name	R.A./°	Decl./°	Source Type	Ave.HR (outburst)	Ave.HR (low flux)
					5 – 7/3 – 5 keV	5 – 7/3 – 5 keV
4	4U 1722–30	261.89	–30.8	(NS) LMXB	0.32 ± 0.02	0.25 ± 0.03
5	GRS 1915+105	288.80	10.95	(BH) LMXB	0.530 ± 0.006	0.46 ± 0.07
6	SWIFT J0243.6+6124	40.92	61.43	(NS) HMXB	0.581 ± 0.004	0.52 ± 0.09
7	1A 0535+262	84.73	26.32	(NS) HMXB	0.74 ± 0.01	0.6 ± 0.1

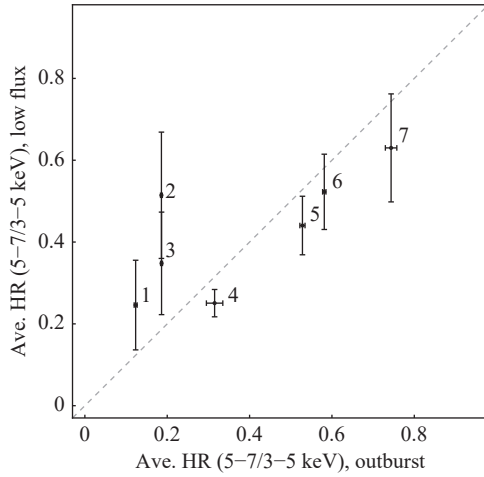


图 20 7个XRB在爆发态和低流量态时平均HR的关系. 图片改编自Wang等人的文章^[10].

Fig. 20 Relationship between the average hardness ratio in outburst and low-flux states of the 7 XRBs. Figure adapted from Wang et al.^[10].

2. 在低流量和爆发状态, SWIFT J0243.6+6124和1A 0535+262这两个NS-HMXB的HR均高于剩下的5个双星系统, 进一步印证了上一小节中的结论.

5 总结

慧眼-HXMT作为中国第1颗通用型空间X射线望远镜, 已经在轨平稳运行超过8 yr时间. 银道面扫描巡天作为其3大核心任务之一, 占据了1/4到1/3的观测时间. 在2–6 keV (LE)、7–40 keV (ME)和25–100 keV (HE)分别达到了1.4、7.2以及 $4.7 \times 10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的累积灵敏度. 慧眼-HXMT对银道面上1300多个已知X射线源展开了

长期流量监测, 并探测到了其中的200余个天体的X射线信号, 构建了宽波段的监测源表.

基于这些亮源的 F_{rms} 分析了它们的流量变化情况, 通过研究 F_{rms} 与源类型之间的关系, 我们发现:

1. 大多数超新星遗迹的流量是稳定的. 大多数孤立脉冲星和Seyfert 1星系的流量变化很小或接近零.

2. 黑洞双星的流量变化幅度比中子星双星更大.

3. 大部分NS-LMXB在2–6 keV的流量变化幅度比高能段要更小, 这可能是和NS-LMXB的能谱成分有关.

4. HMXB的 F_{rms} 在不同能段的变化更为复杂, 这可能与不同类型的HMXB中更加多样的吸积过程有关.

根据流量和能谱的活动性将所有亮源划分为 $F_V \& S_V$ 、 $F_V \& S_S$ 和 $F_S \& S_S$ 源3大类, 我们分析了这3组源的HR的分布特征. 通过对比不同类型的源在7 keV以下的HR分布特点发现: 在未分类的源中可能LMXB占比较多, 而在主星类型不明确的双星系统中可能NSXB占比更多. 在对3组活跃程度的源空间分布特点的研究中发现这3组源呈现出很明显的聚集趋势, 其中 $F_S \& S_S$ 源主要聚集在 $19^\circ < l < 42^\circ$ 的范围内, $F_V \& S_V$ 源则集中在 $-20^\circ < l < 9^\circ$ 的区域, 这是一个很值得注意的现象.

未来随着国内外越来越多空间X射线望远镜投入运行, 慧眼-HXMT的扫描观测也将进行适应性调整, 计划协同EP (Einstein Probe)卫星进行联合的银道面扫描观测, 以充分发挥两者的优势. 慧

眼-HXMT凭借其宽探测能段、高能量分辨率和高时间分辨率的优势,能够对源进行深入的能谱和时变研究. EP卫星在软X射线能区有最大的瞬时视场(3600 deg^2)以及对弱源优于角分的定位精度,在探测暗弱变源方面具有显著优势. 通过慧眼-HXMT与EP的联合扫描观测,可实现优势互补,预计将在未知短时标变源的领域取得新的成果.

致谢 本项工作利用了中国国家航天局(CNSA)和中国科学院(CAS)资助的慧眼-HXMT任务的数据.

参考文献

- [1] Zhang S N. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [2] Baumgartner W H, Tueller J, Markwardt C B, et al. ApJS, 2013, 207: 19
- [3] Bird A J, Bazzano A, Malizia A, et al. ApJS, 2016, 223: 15
- [4] Chen Y, Cui W, Li W, et al. SCPMA, 2020, 63: 249505
- [5] Cao X, Jiang W, Meng B, et al. SCPMA, 2020, 63: 249504
- [6] Liu C, Zhang Y, Li X, et al. SCPMA, 2020, 63: 249503
- [7] Liao J Y, Zhang S, Chen Y, et al. JHEAp, 2020, 27: 24
- [8] Sai N, Liao J Y, Li C K, et al. JHEAp, 2020, 26: 1
- [9] Wang C, Liao J Y, Guan J, et al. ApJS, 2023, 265: 523
- [10] Wang C, Liao J Y, Guan J, et al. RAA, 2024, 24: 025013
- [11] Nang Y, Liao J Y, Sai N, et al. JHEAp, 2020, 25: 39
- [12] Li T P, Wu M. Ap&SS, 1993, 206: 91
- [13] Li T P, Wu M. Ap&SS, 1994, 215: 213
- [14] Guan J, Lu F J, Zhang S, et al. JHEAp, 2020, 26: 11
- [15] Chen Y, Li T P, Wu M. A&AS, 1998, 128: 363
- [16] Lu F J, Aschenbach B, Song L M. A&A, 2001, 370: 570
- [17] Vaughan S, Edelson R, Warwick R S, et al. MNRAS, 2003, 345: 1271
- [18] Mitsuda K, Inoue H, Koyama K, et al. PASJ, 1984, 36: 741
- [19] Fabbiano G. ARA&A, 2006, 44: 323
- [20] Alpar M A, Cheng A F, Ruderman M A, et al. Nature, 1982, 300: 728
- [21] Belczynski K, Ziolkowski J. ApJ, 2009, 707: 870
- [22] Zhang S N. FrPhy, 2013, 8: 630

Catalog of Wide X-ray Energy Band Monitoring Sources in the 6-yr Galactic Plane Scanning Survey of *Insight*-HXMT

LIAO Jin-yuan¹ GUAN Ju¹ WANG Chen^{1,2}

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(2 China Center of Advanced Science and Technology, Beijing 100190)

ABSTRACT Here we review the six-year Galactic plane scanning survey of the *Insight*-HXMT (*Insight* Hard X-ray Modulation Telescope), focusing on the monitoring results and analysis of the known X-ray sources on the Galactic plane. During the first six years of its orbital operation, *Insight*-HXMT spent approximately 1/4 to 1/3 of its total observation time conducting over 3000 scanning observations of the Galactic plane in the wide energy range of 1–100 keV. Long-term flux monitoring was carried out for > 1300 different types of X-ray sources (detecting X-ray signals from approximately 200 celestial bodies), and the monitoring results were compiled and analyzed, including the activity and spectral characteristics of different types of celestial bodies. This paper first introduces the data characteristics and data analysis methods of the *Insight*-HXMT scanning observations (direct demodulation imaging and light curves fitting), then provides an overall description of the monitoring results of the *Insight*-HXMT's scanning survey, and finally presents a statistical analysis of the nature of the monitored sources, such as spatial distribution characteristics, variability activity analysis, and hardness ratio analysis.

Key words space vehicles: instruments, methods: data analysis, X-rays: survey