

宽线与窄线赛弗特1型星系的长期 中红外光变比较^{*}

胡志鹏 毛李胜[†]

(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)

摘要 利用广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)的档案数据比较了宽线赛弗特1型(Broad-line Seyfert 1, BLSy1)星系和窄线赛弗特1型(Narrow-line Seyfert 1, NLSy1)星系的长期中红外光变幅度. 此外还分析了长期中红外光变幅度与常见活动星系核参数的相关性, 使用的样本有BLSy1星系、NLSy1星系、BLSy1与NLSy1星系的合并样本. 主要结果如下: (1) BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系, 可能是因为BLSy1与NLSy1星系的吸积盘结构不同. 根据长期中红外光变幅度与常见活动星系核参数的相关性分析结果, BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系也可能主要由于BLSy1与NLSy1星系的爱丁顿比(Eddington ratio)大小不同. (2) BLSy1星系、NLSy1星系和合并样本的长期中红外光变幅度都与5100 Å光度、爱丁顿比、FeII发射线强度成显著的负相关. NLSy1星系的长期中红外光变幅度与[OIII]λ5007发射线强度成显著正相关.

关键词 星系: 赛弗特, 红外: 光变, 辐射机制: 热辐射, 方法: 统计

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)是一类中央核区活动性很强的河外星系, 由位于星系中心的超大质量黑洞(Supermassive Black Hole, SMBH)吸积物质提供动力^[1-2]. 形态致密、高光度、宽的连续谱辐射和强的发射线是它们的观测特征. 赛弗特星系(Seyfert Galaxies)是亮度较低的一类活动星系核, 它们的光谱中有明显的发射线, 例如氢巴尔末发射线、[OIII]λλ4959、5007发射线、MgII发射线等. 根据光谱特征, 赛弗特星系主要被分为两个次类: 赛弗特1型星系和赛弗特2型星系. 前者的光谱显示宽线, 包括允许线(如

HI、HeI或HeII)以及较窄的禁线(如[OIII]), 也有少部分窄允许线. 后者的光谱只显示出狭窄的允许线和禁线^[3]. 根据发射线特性, 赛弗特1型星系进一步分为宽线赛弗特1型(Broad-line Seyfert 1, BLSy1)星系和窄线赛弗特1型(Narrow-line Seyfert 1, NLSy1)星系. NLSy1星系最初的分类标准如下: Hβ发射线的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)相对较窄, 即FWHM小于2000 km·s⁻¹以及弱的[OIII]发射线, 即[OIII]发射线与Hβ发射线的流量比小于3^[4-5], 并且有较高的黑洞吸积率. 与BLSy1星系相比, NLSy1星系表现出更强的FeII辐射^[6]、强的软X射线过剩、快速的X射线流量变化^[7-9]、更低的黑洞质量和更高的爱丁顿

2024-08-21收到原稿, 2024-12-27收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(12063007)资助

[†]maolisheng@ynnu.edu.cn

比(Eddington ratio)^[10–14]. 然而到目前为止, BLSy1和NLSy1星系的关系还不清楚. NLSy1星系可能是处于演化早期的活动星系核, 比BLSy1星系的演化阶段更早^[15–17], 但也有研究发现两者具有相似的黑洞质量和爱丁顿比, 它们的差异在于几何结构不同^[18–19].

从射电波段到高能 γ 波段, 活动星系核的非周期性光变普遍存在, 时间尺度从分钟到数年不等^[20]. 光变为研究活动星系核提供了许多宝贵的线索, 例如估计黑洞质量^[21–22]、探索吸积盘、宽线区和尘埃环的结构特征^[23–27]. 光变也被广泛用于活动星系核的搜寻与证认^[28–30], 一些过程被用来解释活动星系核的光变, 例如吸积盘不稳定性、泊松过程和星爆模型等^[31–34]. 因此, 研究BLSy1和NLSy1星系的光变可以帮助了解它们中心黑洞及其周围结构的物理性质. BLSy1和NLSy1星系在紫外和光学波段的长期光变幅度已经被多次比较, 例如文献^[35–38]. 他们的研究表明BLSy1星系在紫外和光学波段的长期光变幅度大于NLSy1星系. 由于活动星系核中紫外和光学辐射主要来源于吸积盘, 不同大小的光变幅度可能表明BLSy1和NLSy1星系吸积盘上发生的物理过程不同^[37]. BLSy1与NLSy1星系在紫外和光学波段的长期光变幅度被发现与一些常见的活动星系核参数存在相关性, 特别是与5100 Å光度、爱丁顿比、FeII发射线强度的负相关性, 所以不同的光变幅度大小可能暗示着BLSy1与NLSy1星系有不同的观测特征^[35, 37–38].

活动星系核的红外辐射主要来源于其中心超大质量黑洞吸积物质产生的紫外和光学光子对尘埃环加热后的热辐射^[39–40]. BLSy1和NLSy1星系在紫外和光学波段的长期光变行为已经被广泛研究, 但在红外波段对它们长期光变行为的研究较少, 本文将比较两者的中红外长期光变幅度. 按照活动星系核的标准模型, 红外光变幅度一方面取决于紫外和光学光变幅度的大小, 另一方面也与尘埃环覆盖因子(Covering Factor, CF)有关. 对这两类星系的中红外光变行为进行研究除了可以与紫外和光学光变行为进行对比, 间接提供吸积过程的有用线索, 也可以用于分析活动星系核的尘埃

环及尘埃环的物理性质^[41–44].

光变与活动星系核参数的相关性分析是探索活动星系核物理机制的有效方法. 文献^[45]发现长期中红外光变幅度与5100 Å光度、爱丁顿比、FeII发射线强度成负相关, 但是仅对NLSy1星系进行了系统研究. 本文对BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变幅度与常见活动星系核参数的相关性进行分析, 还对BLSy1和NLSy1星系样本进行了合并, 以探究赛弗特1型星系整体的长期中红外光变与活动星系核参数的相关性. 与紫外和光学波段相比, 红外波段还有独特的优势: 在低红移活动星系核中, 红外连续谱不受强发射线的影响, 而且受尘埃消光的影响较小^[46].

2 样本和数据

2.1 样本

在这项工作中, 我们使用了文献^[47]提供的最新赛弗特1型星系目录¹, 其中包括52273个BLSy1星系和22656个NLSy1星系. 该目录是使用公开的软件(Bayesian AGN Decomposition Analysis for SDSS Spectra)对第17版斯隆数字巡天数据(the Sloan Digital Sky Survey Data Release 17, SDSS-DR 17)中类星体和星系的光谱进行详细分解得到的. 在这个目录中包含被FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters)探测到具有射电辐射的源, 其中有2568个BLSy1星系和730个NLSy1星系^[48]. 与所有BLSy1和NLSy1星系的数量相比, 它们的数量相对较少, 分别占4.91%和3.22%. 由于射电噪的活动星系核喷流的同步辐射对红外光变可能有显著贡献, 为了排除这种影响, 我们把上述存在射电辐射的BLSy1和NLSy1星系进行剔除, 剩余49705个BLSy1星系和21926个NLSy1星系.

2.2 WISE长期光变数据

广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)搭载了一台40 cm口径的红外望远镜, 在2010年7月已经首次完成了对全天区的中红外波段巡天. 在W1、W2、W3和W4波段, 对应波长分别为3.4 μm 、4.6 μm 、12 μm 和22

¹<https://www.ucm.es/blazars/seyfert>

μm , 分别以6.1"、6.4"、6.5"和12.0"的空间分辨率工作, 它每6个月完成一次全天区巡天, 灵敏度比以前的红外巡天任务如红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)高得多^[49]. 在美国航空航天局资助下WISE数据处理系统得到改进, 并重新命名为近地天体广域红外巡天探索(Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer, NEOWISE). NEOWISE只在W1和W2波段进行巡天, 到2011年2月工作结束进入休眠期^[50]. 2013年12月NEOWISE结束了休眠期重新启用, 保持了原有的探测性能, 继续W1和W2波段的巡天任务, 这一巡天任务被命名为NEOWISE-R^[51], 该任务已于2024年7月结束. 为了计算BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变幅度, 我们使用NEOWISE-R巡天提供的全部数据, 时间为2013年12月到2024年7月, 长达约10.6 yr. 因为W1波段数据的信噪比高于W2波段, 所以本文利用美国航空航天局红外科学数据库(Infrared Science Archive, IRSA)获取了49705个BLSy1星系和21926个NLSy1星系在W1波段的测光数据, 搜索半径为3". 接着对初始数据进行了必要的筛选, 采用了文献^[52]和文献^[53]的标准剔除了不良数据:

(1) $w1rchi2 < 5$: $rchi2$ 为轮廓拟合光度测量的约化卡方值, $w1rchi2 < 5$ 表示在W1波段, 轮廓拟合光度测量的约化卡方值小于5.

(2) $nb < 3$: nb 为点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的数量, $nb < 3$ 表示源进行多帧管道轮廓拟合时, 同时使用的PSF的数量小于3.

(3) $cc_flags = 0$: cc_flags 为污染和混淆标志, $cc_flags = 0$ 表示在W1波段, 源进行光度测量或位置测量时没有受到已知图像伪影的干扰和影响.

(4) $qual_frame > 0$: $qual_frame$ 为帧质量评分, $qual_frame > 0$ 意味着该帧的质量得分大于0, 说明该帧的图像质量、噪声等因素相对较好, 数据较为可靠.

(5) $qi_fact > 0$: qi_fact 为单帧图像质量分数, $qi_fact > 0$ 表示在W1波段, 源进行测光测量或位置测量时单帧图像的质量分数大于0.

(6) $saa_sep > 0$: saa_sep 为南大西洋异常区

(South Atlantic Anomaly, SAA)的分隔标志, $saa_sep > 0$ 表示NEOWISE在观测时与SAA边界的角距离大于0, NEOWISE位于SAA边界之外, 受SAA影响较小.

(7) $moon_masked = 0$: $moon_masked$ 为月球遮蔽标志, $moon_masked = 0$ 表示在W1波段, 源进行测光测量或位置测量时没被月球的散射光污染.

此外还剔除了W1星等仅为上限的数据点. 对于BLSy1星系, W1星等仅为上限的数据点数为84143, 大约占总数据点的0.55%. 对于NLSy1星系, W1星等仅为上限的数据点数为59571, 大约占总数据点的0.99%. 测光数据质量详情可参考广域红外巡天探测器官方文档². 剔除不良数据后分割观测窗口(epoch), 两个观测窗口的间隔大小为NEOWISE-R完成一次全天空覆盖的时间(约180 d). 分割完后得到每个样本的所有观测窗口, 每个观测窗口时长约为1 d. 经过不良数据的剔除和窗口的分割后有2040个BLSy1星系和1624个NLSy1星系的观测窗口数小于或者等于17, 分别占去除射电源后样本的4.10%和7.41%. 为了确保BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变幅度得到稳健分析, 仅保留大于17个观测窗口的样本, 剩余47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系.

3 方法

3.1 加权平均

因为本文研究BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变情况, 所以对47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系的每个观测窗口的数据都进行了加权平均^[54-55]. 每个观测窗口的星等序列数据为 $m_1, m_2, \dots, m_N$, 对应误差为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$, N 是每个观测窗口中的测光点数. 星等的加权平均值 $\bar{m}_{\text{wtd}}$ 为:

$$\bar{m}_{\text{wtd}} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i m_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \quad (1)$$

²<http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/neowise/expsup/>

其中权重 $\omega_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$, $\bar{m}_{\text{wtd}}$ 的标准误差为:

$$\sigma_{\bar{m}_{\text{wtd}}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^N \omega_i m_i^2}{\sum_{i=1}^N \omega_i} - \bar{m}_{\text{wtd}}^2 \right]}. \quad (2)$$

为展示经过上述处理得到的长期光变数据, 我们给出两个源的光变曲线作为示例. 图1 (a)和图1 (b) 分别为BLSy1星系 SDSS J000115.88+051902.0和 NLSy1星系 SDSS J144619.29+005317.9的长期中红外光变曲线.

3.2 长期光变幅度

为了表征BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变, 对每条光变曲线进行方差分析, 再减去方差中的观测不确定度, 以此计算上述保留的样本的光变幅度 σ_m , σ_m 由下式给出^[56-58]:

$$\sigma_m = \begin{cases} \sqrt{\Sigma^2 - \epsilon^2} & \text{if } \Sigma > \epsilon \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

(3)式中 Σ 是光变曲线的标准差, ϵ 是总不确定度, Σ 被定义为:

$$\Sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{ep}} - 1} \sum_{i=1}^{N_{\text{ep}}} (m_i - \bar{m}_{\text{wtd}})^2}, \quad (4)$$

(4)式中 N_{ep} 为每个源的观测窗口数量, m_i 是每个观测窗口的星等, $\bar{m}_{\text{wtd}}$ 是每个源所有观测窗口的加权平均星等. ϵ^2 被定义为:

$$\epsilon^2 = \frac{1}{N_{\text{ep}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ep}}} \epsilon_i^2 + \epsilon_s^2. \quad (5)$$

(5)式中 ϵ_i 为每个观测窗口的不确定度, ϵ_s 为系统不确定度. 对于W1波段, 系统不确定度为 0.024 mag^[59].

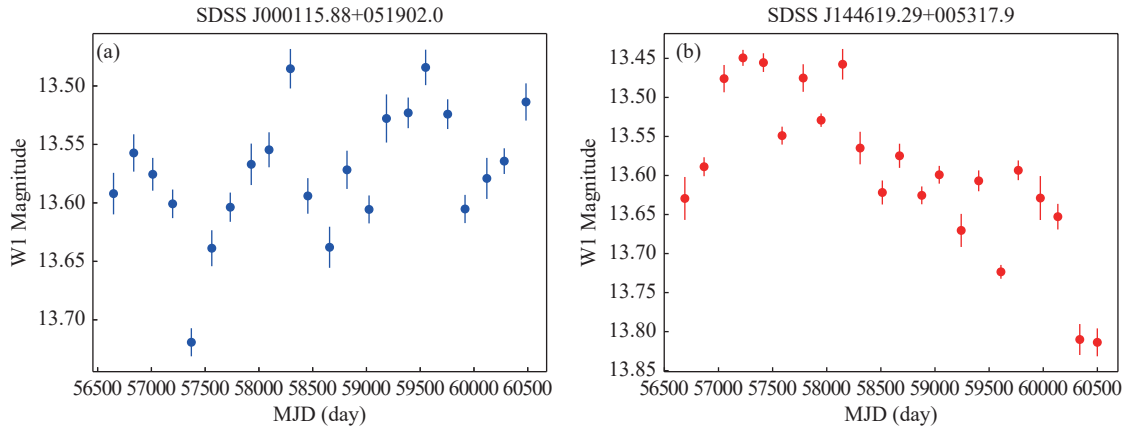


图 1 (a) BLSy1星系SDSS J000115.88+051902.0在W1波段的长期光变曲线. (b) NLSy1星系SDSS J144619.29+005317.9在W1波段的长期光变曲线.

Fig. 1 (a) The long-term light curve of the BLSy1 galaxy SDSS J000115.88+051902.0 in the W1 band. (b) The long-term light curve of the NLSy1 galaxy SDSS J144619.29+005317.9 in the W1 band.

4 结果

4.1 BLSy1与NLSy1星系的中红外光变

采用上述方法, 我们计算了47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系的长期中红外光变幅度. 在BLSy1星系样本中, 有3059个源的 $\sigma_m = 0$, 占6.42%, 有44606个源的 σ_m 不为0; 在NLSy1星系

样本中, 有2274个源的 $\sigma_m = 0$, 占11.20%, 有18028个源的 σ_m 不为0. $\sigma_m = 0$ 可能表明这些源的光变很小. 图2为所有BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 累积概率分布. 从图2中可以看到BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系. 接着计算了所有BLSy1和NLSy1星系 σ_m 的平均值, BLSy1星系 σ_m 的平均值为0.088 mag, NLSy1星系的为0.086

mag. 此外还计算了两种星系 σ_m 的中值和中值的上下误差, 得到BLSy1星系的中值和上下误差为 $0.074^{+0.053}_{-0.040}$ mag, NLSy1星系的为 $0.069^{+0.053}_{-0.045}$ mag. 从 σ_m 的中值也可以看出BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系. 为了进一步验证它们之间的差别, 对BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 做K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验和秩和 (Mann-Whitney) 检验. K-S检验给出的 D 值为0.057, 偶然概率 P 值为 4.262×10^{-40} . 秩和检验给出的 U 统计值为 5.198×10^8 , 偶然概率 P 值为 2.384×10^{-53} . D 值表示两个样本累积分布函数的最大垂直差, P 值表示在原假设为真的情况下, 观察到当前数据或更极端数据的概率, U 统计值表示两组数据秩和的差异程度. 从K-S检验的 D 值可以看出BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系, 从该检验的 P 值可以看出BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 分布显著不同. 秩和检验中较大的 U 值和较小的 P 值也证实两种样本的 σ_m 具有显著不同的分布. 因此在W1波段BLSy1星系的长期光变幅度比NLSy1星系大, 与在紫外和光学波段的比较结果相同, 例如文献[35–38, 60].

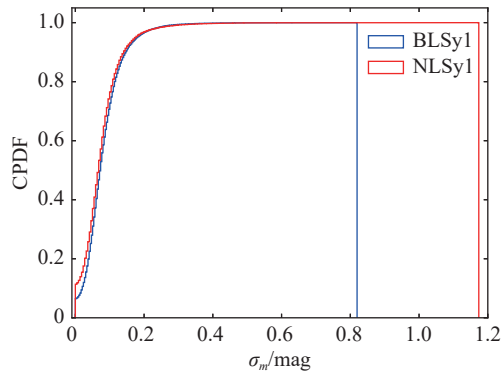


图 2 47665个BLSy1 (蓝色)星系和20302个NLSy1 (红色)星系的长期中红外光变幅度的累积概率分布函数

Fig. 2 The CPDF (Cumulative Probability Distribution Function) of the long-term mid-infrared variability amplitude for 47665 BLSy1 (blue) galaxies and 20302 NLSy1 (red) galaxies

4.2 BLSy1与NLSy1星系子样本的中红外光变

对于活动星系核的光变研究, 越亮的活动星系核越容易探测到它们的小幅度光变. 因此, 为了

避免红外亮度分布差异带来的偏差, 我们对47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系进行红移-W1波段光度二维匹配, 这样的匹配保证了最终的BLSy1和NLSy1星系在亮度分布上没有较大差异. 对于每个源的王1波段光度计算, 首先使用公式 $F_\nu[\text{Jy}] = F_{\nu_0} \times 10^{(-m_{\text{vega}}/2.5)}$ 把47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系的所有测光数据点的W1波段星等转换为流量密度, 其中 F_ν 为天体在某一波段对应频率处的流量密度, F_{ν_0} 为0星等流量密度, 取309.54 Jy, m_{vega} 为织女星等系统 (Vega magnitude system) 中观测到的星等. 接着通过平均得到每个观测窗口的流量密度, 然后每个源的王1波段流量密度用所有观测窗口的平均值来表示, 最后利用公式 $L_{\text{W1}} = 4\pi d_L^2 F_\lambda \lambda$ 计算出每个源的王1波段光度, L 表示天体在特定波长处的辐射光强度, 其中用到的宇宙学参数与文献[47]一致, d_L 表示光度距离, λ 为波长, $F_\lambda = F_\nu \frac{c}{\lambda^2}$, c 表示真空中光速.

表1和表2分别列举了BLSy1和NLSy1星系的基本信息和它们的 σ_m 、W1波段光度. 得到了每个源的王1波段光度后, 设置红移区间和王1波段光度区间的大小分别为0.002和0.01 $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 用47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系在红移-W1波段光度平面内进行最近邻匹配, 得到9323个BLSy1星系和9323个NLSy1星系子样本, 匹配后它们在红移-W1波段光度平面内的分布如图3所示. 图3的上图为匹配后BLSy1和NLSy1星系的红移分布, 右图为W1波段光度分布. 对BLSy1和NLSy1星系的红移、W1波段光度分布做二维K-S检验得到 D 值为0.00091, 偶然概率 P 值为1, 这表明BLSy1和NLSy1星系子样本的红移、W1波段光度的分布没有显著差异[61–62].

为了比较9323个BLSy1星系和9323个NLSy1星系的中红外光变, 我们计算了它们的 σ_m . 图4为这些BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 累积概率分布, 其中包括了 $\sigma_m = 0$ 的733个BLSy1星系和1068个NLSy1星系, 分别占7.86%和11.46%. 从图4中可以明显看到BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系. 接着计算了BLSy1和NLSy1星系 σ_m 的平均值, BLSy1星系 σ_m 的平均值为0.090 mag, NLSy1星系的为0.083 mag. 此外还计算了两

种子样本 σ_m 的中值和中值的上下误差, 得到BLSy1星系的中值和上下误差为 $0.075^{+0.054}_{-0.042}$ mag, NLSy1星系的为 $0.066^{+0.050}_{-0.043}$ mag. 从 σ_m 的中值和平均值也可以看出BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系. 此外, 我们对BLSy1和NLSy1星系子样本的 σ_m 做K-S检验和秩和检验. K-S检验给出的 D 值为0.085, 偶然概率 P 值为 1.322×10^{-29} . 秩和检验给出的 U 统计值为 4.849×10^7 , 偶然概率 P 值为 9.380×10^{-43} . 从K-S检验的 D 值可以看出BLSy1星系子样本的长期中红外光变幅度明显大于NLSy1星系子样本, 从该检验的 P 值可以看出BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 分布显著不同. 秩和检验中较大的 U 值和较小的 P 值也证实两种样本的 σ_m 具有显著不同的分布. 因此控制了红移和W1波段光度后, BLSy1星系的长期中红外光变幅度也大于NLSy1星系.

4.3 尘埃覆盖因子对BLSy1与NLSy1星系中红外光变的影响

因为BLSy1和NLSy1星系的中红外光变幅度可能受到尘埃覆盖因子的影响, 大的尘埃覆盖因

子倾向于表现出更大幅度的中红外光变, 所以我们使用W1波段光度与热光度之比计算了47665个BLSy1星系和20302个NLSy1星系的W1波段尘埃覆盖因子^[63–64]. BLSy1和NLSy1星系的热光度数据也来自于文献[47]提供的新目录, 文献[47]通过 $L_{\text{bol}} = 9.26 \times \lambda L_{\lambda}(5100 \text{ \AA})(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$ 来计算热光度(Bolometric Luminosity), 热光度为天体在所有波长上辐射光强度的总和. 我们通过计算得到BLSy1星系的W1波段尘埃覆盖因子的平均值为0.462, NLSy1星系的为0.526. BLSy1星系的W1波段尘埃覆盖因子的中值为 $0.329^{+0.379}_{-0.136}$, NLSy1星系的为 $0.351^{+0.484}_{-0.154}$. 从平均值和中值来看, NLSy1星系的W1波段尘埃覆盖因子大于BLSy1星系. 对两个样本的W1波段尘埃覆盖因子做K-S检验和秩和检验, K-S检验给出的 D 值为0.055, 偶然概率 P 值为 2.067×10^{-37} , 秩和检验给出的 U 统计值为 4.546×10^8 , P 值为 1.005×10^{-35} . 这两个检验的结果表明BLSy1和NLSy1星系的W1波段尘埃覆盖因子有显著不同的分布.

表 1 BLSy1星系样本和光变幅度结果
Table 1 The BLSy1 galaxies sample and the results of variability amplitude

SDSS Name	RA	DEC	Z	$\lg [\lambda L_{5100}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})]$	N_{ep}	σ_m/mag	$\lg [L_{\text{W1}}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})]$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
J000000.15+353104.2	0.001	35.518	0.845	44.943	22	0.108	45.177
J000001.01+080422.5	0.004	8.073	0.857	44.389	22	0.012	44.873
J000001.33+112029.8	0.006	11.342	0.538	42.864	21	0.128	44.018
J000001.95+052108.7	0.008	5.352	0.404	43.861	22	0.072	44.212
J000002.50+021818.9	0.010	2.305	0.788	43.872	22	0.000	44.592
J000003.24+113119.1	0.014	11.522	0.482	43.367	22	0.105	44.117
J000005.49+310527.6	0.023	31.091	0.286	44.033	22	0.134	44.239
J000010.97+005653.3	0.046	0.948	0.653	43.333	18	0.186	44.240
J000011.96+000225.2	0.050	0.040	0.480	44.572	22	0.053	45.072
J000016.49+022715.1	0.069	2.454	0.885	44.406	22	0.144	45.027

Notes: (1) source name; (2) right ascension; (3) declination; (4) redshift; (5) continuum luminosity at 5100 Å on logarithmic scale; (6) the number of observation epochs for each source; (7) the variability amplitude in the W1 band; (8) W1 band luminosity on logarithmic scale. The complete Table 1 can be accessed by <https://paperdata.china-vo.org/MLS/NLS1.rar>.

表 2 NLSy1 星系样本和光变幅度结果
Table 2 The NLSy1 galaxies sample and the results of variability amplitude

SDSS Name	RA	DEC	Z	$\lg [\lambda L_{5100}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})]$	N_{ep}	σ_m/mag	$\lg [L_{\text{W1}}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})]$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
J000000.47-002703.9	0.002	-0.451	0.250	42.964	22	0.067	43.318
J000002.06+192417.7	0.009	19.405	0.847	44.117	21	0.137	44.542
J000011.41+145545.6	0.048	14.929	0.460	44.241	22	0.176	44.612
J000016.29+263337.4	0.068	26.560	0.895	44.019	22	0.019	44.782
J000016.44+215610.7	0.069	21.936	0.395	43.604	21	0.069	43.905
J000018.78+231257.5	0.078	23.216	0.658	43.760	22	0.000	44.240
J000019.50+303741.3	0.081	30.628	0.675	43.732	21	0.247	44.280
J000023.25+192732.2	0.097	19.459	0.841	43.696	22	0.052	44.847
J000026.27+022140.8	0.109	2.361	0.770	43.649	22	0.127	44.472
J000027.12+354823.6	0.113	35.807	0.443	43.154	22	0.093	43.875

Notes: (1) source name; (2) right ascension; (3) declination; (4) redshift; (5) continuum luminosity at 5100 Å on logarithmic scale; (6) the number of observation epochs for each source; (7) the variability amplitude in the W1 band; (8) W1 band luminosity on logarithmic scale. The complete Table 2 can be accessed by <https://paperdata.china-vo.org/MLS/NLS1.rar>.

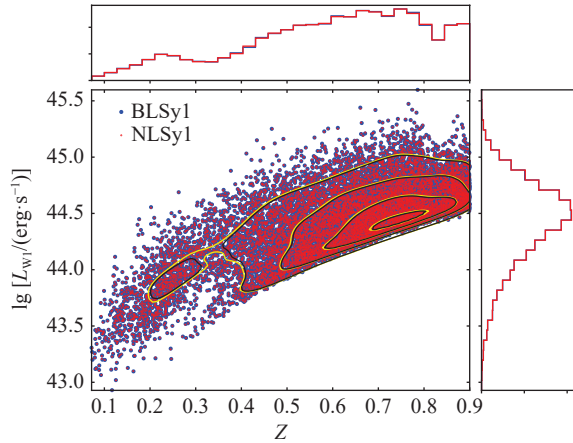


图 3 9323 个 BLSy1 (蓝色) 星系和 9323 个 NLSy1 星系 (红色) 的红移和 W1 波段光度的散点分布. 黄色和黑色实线分别为 BLSy1 和 NLSy1 星系的密度等高图, 从外到内分别是 25%、50%、75%、95% 密度等高线. 图中还显示了红移 (上) 和 W1 波段光度 (右) 的直方分布.

Fig. 3 The scatter distribution of redshift and W1 band luminosity of 9323 BLSy1 (blue) galaxies and 9323 NLSy1 (red) galaxies. The yellow and black solid lines represent the density contour maps of BLSy1 and NLSy1 galaxies, respectively. From the outer to the inner contour, the density levels correspond to 25%, 50%, 75%, and 95%. The figure also shows the histogram distribution of redshift (top) and W1 band luminosity (right).

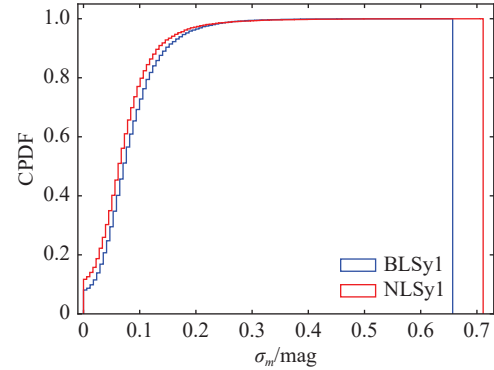


图 4 9323 个 BLSy1 (蓝色) 星系和 9323 个 NLSy1 (红色) 星系的长期中红外光变幅度的累积概率分布函数

Fig. 4 The CPDF of the long-term mid-infrared variability amplitude for 9323 BLSy1 (blue) galaxies and 9323 NLSy1 (red) galaxies

因为有可能 W2 波段更接近尘埃环红外辐射的光谱能量分布 (Spectral Energy Distribution, SED) 峰值, 所以为了更好地对 BLSy1 和 NLSy1 星系的尘埃覆盖因子进行讨论, 我们还计算了两类星系的 W2 波段尘埃覆盖因子. 首先获取了 52273 个 BLSy1 星系和 22656 个 NLSy1 星系的 W2 波段数据, 使用与 W1 波段相同的标准对两类星系的 W2 波段

数据进行了质量筛查,最后保留观测窗口数量大于17个的源,包括46782个BLSy1星系和18965个NLSy1星系.根据W1波段使用的方法计算出这些星系的W2波段尘埃覆盖因子,统计后得到BLSy1星系的W2波段尘埃覆盖因子的平均值和中值分别为0.599和 $0.433^{+0.467}_{-0.175}$,NLSy1星系的W2波段尘埃覆盖因子的平均值和中值分别为0.675和 $0.454^{+0.591}_{-0.197}$.统计结果表明NLSy1星系的W2波段尘埃覆盖因子大于BLSy1星系,与W1波段的结果一致.对两类星系的W2波段尘埃覆盖因子进行K-S检验和秩和检验,得到K-S检验的 D 值为0.049, P 值为 9.807×10^{-29} ,得到秩和检验的 U 统计值为 4.237×10^8 , P 值为 1.971×10^{-19} .这两个检验表明BLSy1与NLSy1星系的W2波段尘埃覆盖因子的分布显著不同.

此外,我们对控制红移和W1波段光度后子样本的W1波段尘埃覆盖因子进行了相同分析.通过计算得到BLSy1星系子样本的W1波段尘埃覆盖因子的平均值和中值分别为0.495和 $0.356^{+0.435}_{-0.152}$,NLSy1星系子样本的为0.527和 $0.346^{+0.464}_{-0.147}$.从平均值和中值来看,它们的尘埃覆盖因子没有明显差别.对两个子样本的尘埃覆盖因子做K-S检验和秩和检验,K-S检验给出 D 值为0.021, P 值为0.032,秩和检验的 U 统计量为 4.380×10^7 , P 值为0.349.这两个检验的结果表明BLSy1和NLSy1星系子样本的W1波段尘埃覆盖因子的分布没有显著差异.

以上结果表明尘埃覆盖因子可能不是导致BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系的主要因素.因此这两类星系的长期中红外光变幅度差异可能主要来源于吸积盘.当然本文只是对尘埃覆盖因子做了粗略的估计,更系统的估计需要未来更深层次的研究.

4.4 σ_m 与各活动星系核参数的关系

本节通过线性回归方法研究44606个BLSy1星系和18028个NLSy1星系的W1波段长期光变幅度与5100 Å光度 $[\lg(\lambda L_{5100})]$ 、黑洞质量 $[\lg(M_{\text{BH}}/M_{\odot})]$ 、爱丁顿比 $(\lg R_{\text{Edd}})$ 、H β 发射线宽分量的FWHM $(\lg \text{FWHM}_{\text{H}\beta})$ 、FeII发射线强度 $(\lg R_{4570})$ 以及[OIII] $\lambda 5007$ 发射线强度 $(\lg R_{5007})$ 的相关性.5100

Å光度指天体在5100 Å处的辐射光强度.爱丁顿比是一种可以描述活动星系核吸积速率的物理参数,它由热光度(L_{bol})和爱丁顿光度(L_{Edd})之比定义^[65]: $R_{\text{Edd}} = L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$,其中 $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} M_{\text{BH}}/M_{\odot} (\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$.FeII发射线强度被定义为波长4434–4684 Å的FeII发射线的流量与宽成分H β 发射线的流量之比,即 $R_{4570} = f(\text{FeII}(\lambda 4434-4684))/f(\text{H}\beta)$. [OIII] $\lambda 5007$ 发射线强度被定义为[OIII] $\lambda 5007$ 发射线的流量与窄成分H β 发射线的流量之比,即 $R_{5007} = f([\text{OIII}]\lambda 5007)/f(\text{H}\beta)$ ^[66].类似文献[35, 37–38], σ_m 与各活动星系核参数的相关性分析在对数坐标系中进行,所以本节的相关性分析未考虑 σ_m 为0的源,这些源的数量已在4.1节给出.我们使用最小二乘法对BLSy1星系、NLSy1星系和两种星系合并后全部样本的 σ_m 和上述活动星系核参数进行线性拟合,还给出了BL-Sy1和NLSy1星系的等密度分布以及散点分布,并且分别计算了这3个样本的 σ_m 与各活动星系核参数的斯皮尔曼相关系数和偶然概率 P 值,在表3中展示了所有相关性计算结果.相关性分析中用到的活动星系核参数的数据来自文献[47]产生的新目录,用44606个BLSy1星系和18028个NLSy1星系与该目录中对应源的数据进行匹配,最后得到了这些源的6个活动星系核参数的数据.

4.4.1 σ_m 与5100 Å光度、黑洞质量和爱丁顿比的关系

图5为BLSy1星系、NLSy1星系和全部样本的长期中红外光变幅度与5100 Å光度和黑洞质量的关系图.从图5(a)中可以看到BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 与5100 Å光度都呈现出显著的负相关,全部样本也呈现出显著负相关.这种显著负相关可以由表3中的斯皮尔曼相关系数和偶然概率 P 值证实,而且与文献[38]在光学波段对BLSy1和NLSy1星系的研究中得到的结果是相同的.此外,这种负相关性不仅仅存在于赛弗特星系,还存在于其他类型活动星系核的研究中,如文献[67–70].文献[47]样本的黑洞质量是利用中心黑洞周围宽线区云的维里化估算得到^[22].从图5(b)中看到BLSy1星系、NLSy1星系以及全部样本的长期中红外光变幅度与黑洞质量没有明显相关性.文献

[35]在紫外和光学波段发现, 当考虑到光变幅度对爱丁顿比的依赖时, 光变幅度对黑洞质量的依赖性消失. 长期中红外光变幅度与爱丁顿比和 $H\beta$ 发射线宽分量的FWHM的关系由图6给出. 从图6 (a)中可以看到BLSy1星系、NLSy1星系和全部样本的长期中红外光变幅度与爱丁顿比都表现出明显的负相关. 表3中可以看到经过线性回归量化后的

负相关结果. 文献[45]对NLSy1星系的长期中红外光变幅度进行了相关性分析, 也得到了光变幅度与爱丁顿比的这种负相关. 文献[35]在紫外和光学波段发现长期光变幅度与爱丁顿比成显著负相关, 他们的样本也是BLSy1星系、NLSy1星系和合并样本. 在很多类星体的研究中也发现了这种相关性^[67–69, 71].

表 3 光变幅度(σ_m)与各活动星系核参数的关系
Table 3 Correlation of amplitude of variability (σ_m) with different AGN parameters

Sample	Size1	$\lg[\lambda L_{5100}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})]$	$\lg(M_{\text{BH}}/M_{\odot})$	$\lg R_{\text{Edd}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
BLSy1	44606	-0.20 (≈ 0)	-0.06 (2.78×10^{-38})	-0.17 (1.39×10^{-271})
NLSy1	18028	-0.19 (1.52×10^{-148})	-0.09 (5.25×10^{-31})	-0.20 (1.08×10^{-158})
Total	62634	-0.19 (≈ 0)	-0.03 (9.98×10^{-14})	-0.15 (2.97×10^{-308})
$\lg[\text{FWHM}_{H\beta}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})]$		$\lg R_{4570}$	Size2	$\lg R_{5007}$
(6)		(7)	(8)	(9)
0.03 (1.81×10^{-10})		-0.13 (5.28×10^{-169})	42433	0.04 (1.31×10^{-14})
0.00 (8.16×10^{-1})		-0.19 (6.60×10^{-144})	16919	0.10 (3.67×10^{-39})
0.03 (3.56×10^{-18})		-0.14 (1.30×10^{-267})	59352	0.06 (1.53×10^{-47})

Notes: (1) sample; (2) the sample size of the first five parameters; columns (3)-(7) note the Spearman correlation coefficient (Chance probability P -value) for 5100 Å luminosity, Black hole mass, Eddington ratio, FWHM of the $H\beta$ emission line, FeII emission line intensity; (8) the size of the sample for [OIII]λ5007 emission line intensity; (9) the Spearman correlation coefficient (Chance probability P -value) for [OIII]λ5007 emission line intensity.

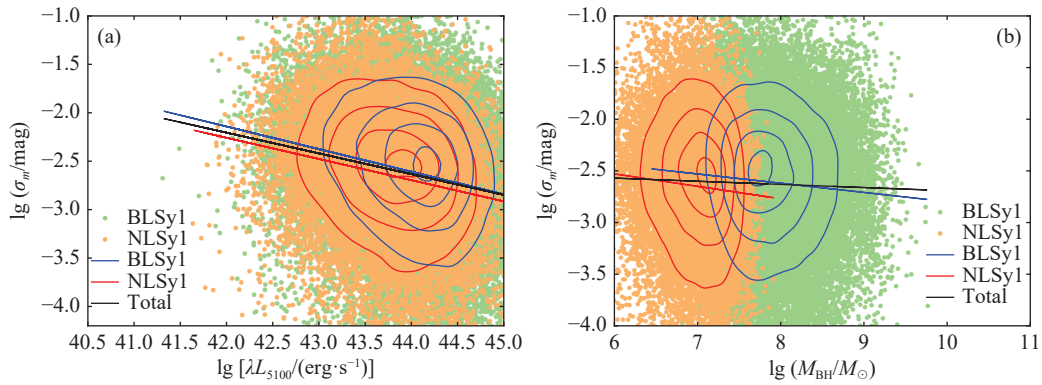


图 5 图(a)和(b)分别展示了BLSy1星系、NLSy1星系和所有样本的长期中红外光变幅度与5100 Å光度和黑洞质量的关系. 图(a)和(b)都展示了两种星系的密度等高线, 由外向内分别是25%、50%、75%、95%密度等高线.

Fig. 5 Panels (a) and (b) display the relationship between the long-term mid-infrared variability amplitude and the 5100 Å luminosity, black hole mass for BLSy1 galaxies, NLSy1 galaxies, and all samples, respectively. Panels (a) and (b) both show the density contour lines of two types of galaxies. From the outer to the inner contour, the density levels correspond to 25%, 50%, 75%, and 95%.

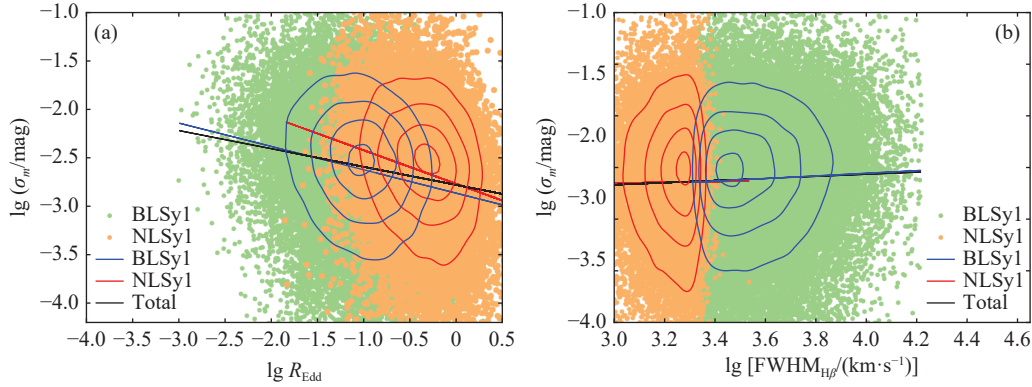


图 6 图(a)和(b)分别展示了BLSy1星系、NLSy1星系和所有样本的长期中红外光变幅度与爱丁顿比和H β 发射线的FWHM的关系.

图(a)和(b)都展示了两种星系的密度等高线,由外向内分别是25%、50%、75%、95%密度等高线.

Fig. 6 Panels (a) and (b) display the relationship between the long-term mid-infrared variability amplitude and the Eddington ratio, FWHM of H β emission line for BLSy1 galaxies, NLSy1 galaxies, and all samples, respectively. Panels (a) and (b) both show the density contour lines of two types of galaxies. From the outer to the inner contour, the density levels correspond to 25%, 50%, 75%, and 95%.

4.4.2 σ_m 与发射线参数的相关性

本节研究了BLSy1星系、NLSy1星系和全部样本的长期中红外光变幅度与H β 发射线宽分量的FWHM、FeII发射线强度和[OIII] λ 5007发射线强度的关系. 通常来说, 窄H β 发射线和[OIII] λ 5007发射线来自窄线区, 宽H β 发射线和FeII发射线来自宽线区. 图6 (b)结合表3发现BLSy1星系、NLSy1星系和合并样本的 σ_m 与FWHM $_{H\beta}$ 没有明显相关性. 图7为BLSy1、NLSy1星系和所有样本的 σ_m 与FeII发射线强度和[OIII] λ 5007发射线强度的关系图. 在图7 (a)中看到3种样本的 σ_m 与FeII发射线强度都表现出明显的负相关, 这一结果被斯皮尔曼相关系数验证. 图7 (b)结合表3发现NLSy1星系的 σ_m 与[OIII] λ 5007发射线强度存在显著正相关, BLSy1星系和全部样本的 σ_m 与[OIII] λ 5007发射线强度没有明显相关性. 文献[45]发现了NLSy1星系的长期中红外光变幅度与 R_{4570} 的显著负相关. 文献[35, 37]发现在紫外和光学波段BLSy1星系、NLSy1星系和合并样本的光变幅度与H β 发射线的FWHM成显著正相关, 与 R_{4570} 成显著负相关. 文献[35]在紫外和光学波段发现这3种样本的长期光变幅度都与 R_{5007} 成显著正相关. 因此在中红外波段的光变幅度与这些发射线参数的相关性与紫外和光学波段的相关性一致, 但

是在中红外波段发现的相关性要弱于紫外和光学波段.

4.4.3 活动星系核参数对BLSy1和NLSy1星系长期中红外光变幅度差异的影响

上两节分析了BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 与6种常见活动星系核参数的相关性. 从相关性结果来看, 两类星系的 σ_m 的差异可能由参数大小不同导致, 但是这种差异与什么参数最相关还不清楚. 结合两种星系物理参数的分布和斯皮尔曼相关系数分析, 两类星系的 σ_m 的差异可能主要与爱丁顿比和 R_{4570} 的大小有关. 因此对爱丁顿比的大小进行控制, 分析两类星系的 σ_m 与 R_{4570} 的相关性, 反之对 R_{4570} 进行控制, 分析两类星系的 σ_m 与爱丁顿比的相关性^[72]. 表4给出限制条件下 σ_m 与活动星系核参数的关系. 从表4中可以看到固定爱丁顿比后, BLSy1星系的 σ_m 与 R_{4570} 的负相关变弱, NLSy1星系的 σ_m 与 R_{4570} 的负相关依然显著. 固定了 R_{4570} 后, BLSy1和NLSy1星系的 σ_m 与爱丁顿比都表现为显著的负相关. 此外可以看到固定 R_{4570} 后两类星系的光变幅度与爱丁顿比的相关系数大于固定爱丁顿比后两类星系的光变幅度与爱丁顿比的相关系数. 以上结果表明两类星系的光变幅度差异可能与爱丁顿比最相关.

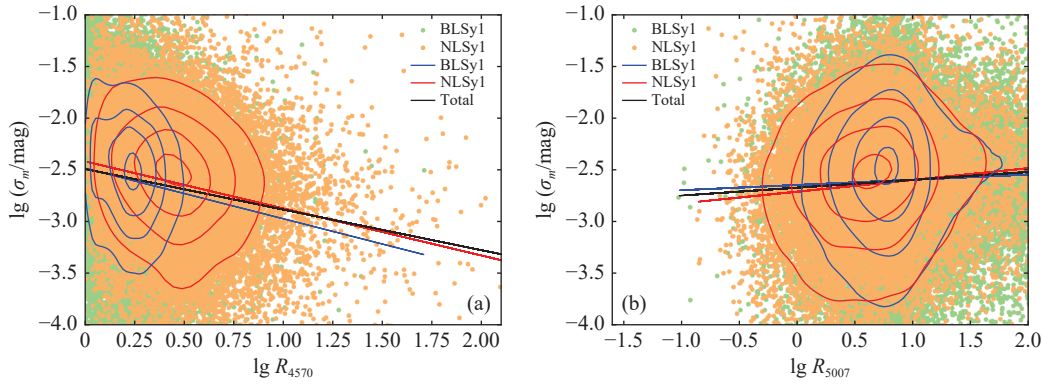


图 7 图(a)和(b)分别展示了BLSy1星系、NLSy1星系和所有样本的长期中红外光变幅度与FeII发射线强度和[OIII] λ 5007发射线强度的关系. 图(a)和(b)都展示了两种星系的密度等高线, 由外向内分别是25%、50%、75%、95%密度等高线.

Fig. 7 Panels (a) and (b) display the relationship between the long-term mid-infrared variability amplitude and the intensity of the FeII emission line and [OIII] λ 5007 emission line for BLSy1 galaxies, NLSy1 galaxies, and all samples, respectively.

Panels (a) and (b) both show the density contour lines of two types of galaxies. From the outer to the inner contour, the density levels correspond to 25%, 50%, 75%, and 95%.

表 4 限制条件下 σ_m 与活动星系核参数的关系
Table 4 Correlation between σ_m and AGN parameters under specific constraints

BLSy1				
	$\lg R_{\text{Edd}} < -1.35$	$-1.35 \leq \lg R_{\text{Edd}} < -1$	$-1 \leq \lg R_{\text{Edd}} < -0.65$	$\lg R_{\text{Edd}} \geq -0.65$
Size	11112	12886	12490	8118
$R_s(P)$	$-0.08 (5.67 \times 10^{-17})$	$-0.07 (5.27 \times 10^{-16})$	$-0.07 (1.05 \times 10^{-15})$	$-0.09 (6.56 \times 10^{-16})$
	$\lg R_{4570} < 0.14$	$0.14 \leq \lg R_{4570} < 0.24$	$0.24 \leq \lg R_{4570} < 0.34$	$\lg R_{4570} \geq 0.34$
Size	11141	11135	10841	11489
$R_s(P)$	$-0.13 (5.24 \times 10^{-41})$	$-0.11 (3.97 \times 10^{-31})$	$-0.11 (1.41 \times 10^{-31})$	$-0.16 (3.73 \times 10^{-66})$
NLSy1				
	$\lg R_{\text{Edd}} < -0.6$	$-0.6 \leq \lg R_{\text{Edd}} < -0.34$	$-0.34 \leq \lg R_{\text{Edd}} < -0.08$	$\lg R_{\text{Edd}} \geq -0.08$
Size	4698	4432	4696	4202
$R_s(P)$	$-0.11 (7.16 \times 10^{-15})$	$-0.10 (2.21 \times 10^{-11})$	$-0.10 (6.02 \times 10^{-11})$	$-0.13 (1.24 \times 10^{-17})$
	$\lg R_{4570} < 0.3$	$0.3 \leq \lg R_{4570} < 0.47$	$0.47 \leq \lg R_{4570} < 0.64$	$\lg R_{4570} \geq 0.64$
Size	4276	4847	4472	4433
$R_s(P)$	$-0.11 (8.11 \times 10^{-13})$	$-0.12 (4.08 \times 10^{-17})$	$-0.12 (7.97 \times 10^{-17})$	$-0.17 (1.59 \times 10^{-31})$

Notes: Size is the number of sources; $R_s(P)$ represents the Spearman correlation coefficient (Chance probability P -value).

5 总结与讨论

本文比较了47665个BLSy1星系和20302个

NLSy1星系的长期中红外光变幅度, 还比较了它们匹配红移-W1波段光度子样本的长期中红外光变

幅度. 由累积概率分布都得到BLSy1星系的长期中红外光变幅度大于NLSy1星系. 该结果已经被K-S检验和秩和检验验证. NLSy1星系较低的光变幅度可能是因为: 与BLSy1星系相比, 其拥有较小的H β 发射线宽度、较低的黑洞质量、较高的爱丁顿比和较强的FeII发射线强度. NLSy1星系处于演化的早期可能是NLSy1与BLSy1星系的活动星系核参数存在较大不同的原因之一. 文献[36–37]认为在紫外和光学波段, BLSy1与NLSy1星系光变幅度的差异是由吸积盘上发生的不同物理过程造成的, 而物理过程存在差异是因为吸积盘的结构不同. 又因为中红外辐射主要来自于被紫外和光学光子所加热尘埃环的热辐射, 所以由吸积盘导致的差异可能被尘埃环反映出来, 导致BLSy1与NLSy1星系的中红外光变幅度存在差异.

此外, 来自喷流的同步辐射可能对中红外辐射存在贡献, 但是本文已经对存在射电辐射的BLSy1和NLSy1星系进行了剔除, 因此BLSy1和NLSy1星系的中红外光变不考虑喷流同步辐射的影响. 除了上述因素外尘埃覆盖因子可能会对红外光变幅度产生影响, 通常认为覆盖因子越大则红外光变幅度越大, 但是本文样本中没有发现BLSy1星系的W1和W2波段尘埃覆盖因子大于NLSy1星系, 所以尘埃覆盖因子可能对它们中红外光变的比较结果影响很小, 它们光变幅度的差异主要来源于吸积盘.

我们还对BLSy1星系、NLSy1星系和它们合并后样本的长期中红外光变幅度与常见活动星系核参数进行了相关性分析, 发现长期中红外光变幅度与这些活动星系核参数之间存在相关性, 特别是光变幅度与5100 Å光度、爱丁顿比、FeII发射线强度的显著负相关. 这3种负相关都在文献[45]中被发现, 文献[72]也发现在10 yr的时间尺度上, 较暗活动星系核的长期中红外光变幅度比较亮的活动星系核大. 很多研究发现紫外和光学波段的光变幅度与5100 Å光度、爱丁顿比、FeII发射线强度都存在着显著的负相关^[35–38, 67–70], 对于紫外和光学波段的光变幅度与爱丁顿比的负相关可以考虑标准的吸积盘模型^[73], 它具有几何薄光学厚的特点. 由于辐射来自内部吸积盘, 辐射强度会随

着向外传播而减弱, 给定波长处的发射区域的半径 r 随爱丁顿比的增大而增大, 这可由 $r \sim T^{-1} \sim (\dot{m}/M_{\text{BH}})^{1/3} \lambda^{4/3}$ 看出. T 是盘的温度, $\dot{m}$ 是以爱丁顿比为单位的质量吸积率^[45]. 对于给定波长, 紫外和光学的光变幅度随爱丁顿比的增大而减小^[74]. 因为中红外辐射与紫外和光学辐射的关系, 长期中红外光变幅度与爱丁顿比的负相关性也可能受到该关系式的影响.

文献[75–77]认为爱丁顿比可能是光变幅度与发射线参数相关性的潜在驱动因素. 本文发现了长期中红外光变幅度与FeII发射线强度和爱丁顿比都表现出了明显的负相关性, 因此中红外光变幅度与FeII发射线强度的相关性可能受到了爱丁顿比的影响. 此外分别控制了爱丁顿比和FeII发射线强度后, 认为最有可能导致BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变幅度差异的参数是爱丁顿比. 与紫外和光学波段的研究相比, 对BLSy1和NLSy1星系的长期中红外光变幅度的比较结果是相同的, 光变幅度与常见活动星系核参数的相关性也都被发现. 然而, 中红外光变幅度与活动星系核参数的相关性没有紫外和光学波段的强, 这可能是由于紫外和光学辐射受到了尘埃环的遮挡, 导致紫外和光学波段的光变被弱化, 从而使中红外波段的光变减弱. 因此本文的结果也支持了这一观点: 中红外辐射来自于被吸积盘的紫外和光学辐射所加热尘埃环的热辐射.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高. 感谢广域红外巡天探测器提供的数据.

参考文献

- [1] Lynden-Bell D. *Nature*, 1969, 223: 5207
- [2] Rees M J. *ARA&A*, 1984, 22: 471
- [3] Weedman D W. *ARA&A*, 1977, 15: 69
- [4] Osterbrock D E, Richard W P. *ApJ*, 1985, 297: 166
- [5] Goodrich R W. *ApJ*, 1989, 342: 224
- [6] Véron-Cetty M P, Véron P, Gonçalves A C. *A&A*, 2001, 372: 730
- [7] Leighly K M. *ApJS*, 1999, 125: 317
- [8] Grupe D R K. *AJ*, 2004, 127: 1799
- [9] Mao L S, Yi T F. *ApJS*, 2021, 255: 10

- [10] Mathur S. *MNRAS*, 2000, 314: L17
- [11] Peterson B M, McHardy I M, Wilkes B J, et al. *ApJ*, 2000, 542: 161
- [12] Collin, Su Z Y, Toshihiro K. *A&A*, 2004, 426: 797
- [13] Komossa S, Xu D. *ApJ*, 2007, 667: L33
- [14] Xu D, Komossa S, Zhou H, et al. *AJ*, 2012, 143: 83
- [15] Mathur S. *NewAR*, 2000, 44: 469
- [16] Mathur S, Kuraszkiewicz J, Czerny B. *NewA*, 2001, 6: 321
- [17] Williams J K, Gliozzi M, Rudzinsky R V. *MNRAS*, 2018, 480: 96
- [18] Baldi R D, Capetti A, Robinson A, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 69
- [19] Liu X, Yang P, Supriyanto R, et al. *IJAA*, 2016, 6: 166
- [20] Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. *ARA&A*, 1997, 35: 445
- [21] Peterson B M. *IAUS*, 2004, 222: 15
- [22] Vestergaard M, Peterson B M. *ApJ*, 2006, 641: 689
- [23] Mangalam A V, Wiita P J. *ApJ*, 1993, 406: 420
- [24] Liu H T, Bai J M, Zhao X H, et al. *ApJ*, 2008, 677: 884
- [25] Pancoast A, Brewer B J, Treu T. *ApJ*, 2011, 730: 139
- [26] Kishimoto M, Hönig S F, Beckert T, et al. *A&A*, 2007, 476: 713
- [27] Minezaki T, Yoshii Y, Kobayashi Y, et al. *ApJ*, 2019, 886: 150
- [28] van den Bergh S, Herbst E, Pritchet C. *AJ*, 1973, 78: 375
- [29] Choi Y, Gibson R R, Becker A C, et al. *ApJ*, 2014, 782: 37
- [30] Burke C J, Shen Y, Liu X, et al. *MNRAS*, 2023, 518: 1880
- [31] Kawaguchi T, Mineshige S, Umemura M, et al. *ApJ*, 1998, 504: 671
- [32] Terlevich R, Tenorio-Tagle G, Franco J, et al. *MNRAS*, 1992, 255: 713
- [33] Torricelli-Ciamponi G, Foellmi C, Courvoisier T J L, et al. *A&A*, 2000, 358: 57
- [34] Aretxaga I, Cid F R, Terlevich R J. *MNRAS*, 1997, 286: 271
- [35] Ai Y L, Yuan W, Zhou H Y, et al. *ApJ*, 2010, 716: L31
- [36] Ai Y L, Yuan W, Zhou H Y, et al. *AJ*, 2013, 145: 90
- [37] Rakshit S, Stalin C S. *ApJ*, 2017, 842: 96
- [38] Wang H T, Guo C, Cao H M, et al. *Ap&SS*, 2023, 368: 68
- [39] Elvis M, Wilkes B J, McDowell J C, et al. *ApJS*, 1994, 95: 1
- [40] Lyu J, Rieke G H, Shi Y. *ApJ*, 2017, 835: 257
- [41] Suganuma M, Yoshii Y, Kobayashi Y, et al. *ApJ*, 2006, 639: 46
- [42] Lyu J, Rieke G H, Smith P S. *ApJ*, 2019, 886: 33
- [43] Wang H T, Shi Y. *RAA*, 2020, 20: 021
- [44] Yang Q, Shen Y, Liu X, et al. *ApJ*, 2020, 900: 58
- [45] Rakshit S, Johnson A, Stalin C S, et al. *MNRAS*, 2019, 483: 2362
- [46] Viswanath G, Stalin C S, Rakshit S, et al. *ApJ*, 2019, 881: L24
- [47] Paliya V S, Stalin C S, Domínguez A, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 7055
- [48] White R L, Becker R H, Helfand D J, et al. *ApJ*, 1997, 475: 479
- [49] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. *AJ*, 2010, 140: 1868
- [50] Mainzer A, Bauer J, Grav T, et al. *ApJ*, 2011, 731: 53
- [51] Mainzer A, Bauer J, Cutri R M, et al. *ApJ*, 2014, 792: 30
- [52] Anjum A, Stalin C S, Rakshit S, et al. *MNRAS*, 2020, 494: 764
- [53] Son S, Kim M, Ho L C. *ApJ*, 2023, 958: 135
- [54] Bevington P R. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. New York: McGraw-Hill, 1969: 57-58
- [55] 毛李胜. *天文研究与技术*, 2021, 18: 162
- [56] Rodríguez-Pascual P M, Alloin D, Clavel J, et al. *ApJS*, 1997, 110: 9
- [57] Sesar B, Ivezić Ž, Lupton R H, et al. *AJ*, 2007, 134: 2236
- [58] Mao L S, Zhang X M, Yi T F. *Ap&SS*, 2018, 363: 167
- [59] Jarrett T H, Cohen M, Masci F, et al. *ApJ*, 2011, 735: 112
- [60] Klimek E S, Gaskell C M, Hedrick C H. *ApJ*, 2004, 609: 69
- [61] Peacock J A. *MNRAS*, 1983, 202: 615
- [62] Fasano G, Franceschini A. *MNRAS*, 1987, 225: 155
- [63] Maiolino R, Shemmer O, Imanishi M, et al. *A&A*, 2007, 468: 979
- [64] Mor R, Trakhtenbrot B. *ApJ*, 2011, 737: L36
- [65] Kaspi S, Smith P S, Netzer H, et al. *ApJ*, 2000, 533: 631
- [66] Zhou H Y, W T G, Yuan W M, et al. *ApJS*, 2006, 166: 128
- [67] Wilhite B C, Brunner R J, Grier C J, et al. *MNRAS*, 2008, 383: 1232
- [68] Kelly B C, Bechtold J, Siemiginowska A. *ApJ*, 2009, 698: 895
- [69] Zuo W, Wu X B, Liu Y Q, et al. *ApJ*, 2012, 758: 104
- [70] Simm T, Salvato M, Saglia R, et al. *A&A*, 2016, 585: A129
- [71] MacLeod C L, Ivezić Ž, Kochanek C S, et al. *ApJ*, 2010, 721: 1014
- [72] Kozłowski S, Kochanek C S, Ashby M L N, et al. *ApJ*, 2016, 817: 119

- [73] Shakura N I, Sunyaev R A. A&A, 1973, 24: 337
[74] Wang H T, Su Y P, Ge X, et al. RAA, 2022, 22: 015014
[75] Boroson T A, Green R F. *ApJS*, 1992, 80: 109
[76] Sulentic J W, Zwitter T, Marziani P, et al. *ApJ*, 2000, 536: L5
[77] Boroson T A. *ApJ*, 2002, 565: 78

The Comparison of Long-term Mid-infrared Variability between Broad-line and Narrow-line Seyfert 1 Galaxies

HU Zhi-peng MAO Li-sheng

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

ABSTRACT The long-term mid-infrared variability amplitude of Broad-line Seyfert 1 (BLSy1) galaxies and Narrow-line Seyfert 1 (NLSy1) galaxies were compared using archival data from the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). Additionally, the correlation between the long-term mid-infrared variability amplitude and common active galactic nucleus parameters was analyzed, using samples that included BLSy1 galaxies, NLSy1 galaxies, and a combined sample of both BLSy1 and NLSy1 galaxies. The main results are as follows: (1) The long-term mid-infrared variability amplitude of BLSy1 galaxies is greater than that of NLSy1 galaxies possibly due to differences in the accretion disk structure between BLSy1 and NLSy1 galaxies. Correlation analysis suggests that the larger long-term mid-infrared variability amplitude in BLSy1 galaxies compared to NLSy1 galaxies may be mainly attributed to differences in Eddington ratio between the two types of galaxies. (2) The long-term mid-infrared variability amplitudes of BLSy1 galaxies, NLSy1 galaxies, and the combined sample are significantly negatively correlated with the 5100 Å luminosity, Eddington ratio and FeII emission line strength. The long-term mid-infrared variability amplitude of NLSy1 galaxies is significantly positively correlated with the [OIII] λ 5007 emission line strength.

Key words galaxies: Seyfert, infrared: variability, radiation mechanisms: thermal radiation, methods: statistical