

使用卷积神经网络方法识别SDSS DR7Q中的FeLoBAL类星体*

何子麒^{1,2†} 傅煜铭^{3,4} 吴学兵^{1,2‡} 何凌雪⁵

(1 北京大学物理学院天文学系 北京 100871)

(2 北京大学科维理天文与天体物理研究所 北京 100871)

(3 Leiden Observatory, Leiden University, Leiden NL-2300 RA)

(4 Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, Groningen NL-9700 AV)

(5 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 1138656)

摘要 铁低电离宽吸收线类星体(Fe Low-ionization Board Absorption Line Quasar, FeLoBALQ)是数量最稀少的类星体子类之一. 该类型类星体的辐射将周围的物质猛烈吹开, 形成强劲高速的外流, 其中以铁为代表的低电离物质, 吸收类星体的辐射, 产生特征的低电离度铁元素宽线吸收谱. FeLoBALQ外流物质携带的能量之高, 足以解释超大质量黑洞质量 M 与宿主星系核球速度弥散度 σ_* 的 $M - \sigma_*$ 关系, 同时有研究表明FeLoBALQ可能与星暴星系或星系主并合存在伴生关系. 然而, 迄今为止搜寻到的FeLoBALQ数量有限, 难以从统计上验证上述理论. 此研究计划在已有类星体大样本中开展大规模的搜寻工作, 挖掘已发现类星体中的FeLoBALQ, 为FeLoBALQ的进一步研究提供样本基础. 使用深度学习中的卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)方法, 将以往发现的FeLoBALQ光谱作为训练样本, 对SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR7Q (Data Release 7 Quasar catalog)中、红移范围为 $0.8 < z < 2.125$ 的共50931条类星体光谱进行鉴别, 新搜寻到了160条FeLoBALQ光谱. 研究发现FeLoBALQ的颜色比一般类星体更红, 且以往发现的FeLoBALQ比新发现的稍微偏红; 这些差异在蓝端更明显, 在中红外波段差异则几乎消失. 结合以往研究发现的FeLoBALQ, 估计FeLoBALQ在该样本的该红移段内, 占类星体总数的比例约为0.43%, 此比例略高于以往研究, 且可能依然偏小. 今后希望将此方法扩展至更大样本如SDSS DR16Q (Data Release 16 Quasar catalog)以发现更多的FeLoBALQ, 并使用大样本研究FeLoBALQ与宿主星系恒星形成、星系主并合的关系以及星系与中心超大质量黑洞的协同演化等问题.

关键词 星系: 活动, 类星体: 吸收线, 方法: 深度学习, 星表

中图分类号: P158; 文献标识码: A

1 引言

在宽吸收线(Board Absorption Line, BAL)类

星体中, 铁低电离宽吸收线类星体(Fe Low-ionization Board Absorption Line Quasar, FeLoBAL类星体, FeLoBALQ)属于一种极为特殊的子类型.

2024-05-15收到原稿, 2024-08-05收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11927804、12133001)资助

[†] zqhe@pku.edu.cn

[‡] wuxb@pku.edu.cn

这类类星体的主要观测特征表现为铁的低电离态吸收谱线, 以FeII为主, 部分观测到FeIII; 并且偶尔伴有HeI、SiIII、NiII的强吸收特征. 铁的吸收相较于标志高电离BAL (High-ionization BAL, HiBAL) 的CIV吸收以及标志低电离BAL (Low-ionization BAL, LoBAL) 的MgII吸收特征而言, 一次电离所需的温度更低; 这意味着FeLoBALQ中的气体外流(outflow)距核心区域的距离大于一般的LoBAL类星体, 说明了FeLoBALQ的气体外流作用更为剧烈. 研究认为, 在星系与中心黑洞协同演化中, 建立超大质量黑洞质量 M 与宿主星系核球速度弥散度 σ_* 之间著名的 $M - \sigma_*$ 关系, 需要约5%的类星体热光度(bolometric luminosity)^[1-2], 而Moe等^[3]的研究表明, FeLoBALQ外流的运动学光度(kinematic luminosity)达到了热光度的1%, 成为协同演化驱动能量的重要组成部分. Faucher-Giguère等^[4]的研究则表明, 对最明亮的FeLoBALQ而言, 其运动学光度占比约为2%–5%, 甚至足以完全驱动协同演化. 这些研究说明, 处于FeLoBALQ状态的类星体, 对于建立中心黑洞与宿主星系的协同演化关系, 可能起到重要的作用.

自从FeLoBALQ被发现以来, 这类类星体有着怎样的物理机制和成因, 一直是亟待解决的问题, 但受限于这类天体数量稀少, 相关的研究始终难以系统性地开展, 也就难以给出具有统计说服力的研究成果. 首先, 在FeLoBAL的产生机制方面, 研究未能得出一致的结果. Yuan等^[5]以及Runnoe等^[6]的研究发现, BAL类星体的[OIII]发射线偏弱而FeII发射线较强, 意味着其吸积率高于非BAL类星体; 但Schulze等^[7]对LoBAL类星体和FeLoBALQ的研究以及Rankine等^[8]对BAL类星体的研究, 给出的BAL以及LoBAL、FeLoBAL等类星体子类的吸积率与非BAL的类星体相同, 与先前的研究存在矛盾.

此外, 在FeLoBAL成因方面, 研究也未能给出统一的模型. Farrah等^[9]在2010年提出, FeLoBALQ可能存在于满足以下3个条件的环境中: (1)星系处于主并合(major merger)驱动的星暴(starburst)末期, (2)高亮度的类星体处于吸积周围尘埃的末期,

(3)我们处在特定的观测视角上. 上述成因得到了一些研究的支持: Farrah等^[10]在2005年在对极亮红外星系(Ultraluminous Infrared Galaxy, ULIRG)的研究中, 发现了4个ULIRG中心存在类星体, 其中一个为FeLoBALQ. ULIRG极高的红外亮度表明了其中富含温热(warm)的气体和尘埃, 并且有着极高的恒星形成率. Farrah等^[11]在2007年对9个FeLoBALQ的红外观测显示, 它们的红外光度与ULIRG一致, 且光学特征标志着每年几百个太阳质量的恒星形成率; 该研究认为, FeLoBALQ与ULIRG宿主星系的极高恒星形成率必然存在某种关联, 很可能存在着类星体与宿主星系的协同演化过程. Lawther等^[12]的研究对FeLoBALQ展开高分辨率观测, 证实了所在环境曾发生过主并合. 但也有部分研究对上述成因进行挑战: Violino等^[13]的研究对17个FeLoBALQ展开亚毫米波观测, 并未证实FeLoBALQ与宿主星系恒星形成之间的关联性. Villforth等^[14]的高分辨率观测, 并未在FeLoBALQ所在的环境中发现主并合的痕迹.

上述研究无法给出一致结论的最主要原因在于当前已发现的FeLoBALQ数量太少, 对少量个体进行研究存在较大的偶然性. 对FeLoBALQ的研究均需要更大的样本, 才能给出具备统计说服力的结论. Leighly和Choi等人的团队关于FeLoBALQ光谱性质的系列研究^[15-18], 使用了50个FeLoBALQ作为研究样本, 是近期关于FeLoBALQ的最大规模、最系统的研究, 给出的结论也具有很强的一致性: 该团队使用FeLoBALQ的光谱吸收特征, 对外流进行研究, 发现外流强度与外流速度存在正相关, 并且有18%的FeLoBALQ外流强度足以完成类星体对宿主星系的反馈^[15]. 该团队对FeLoBALQ的发射强度进行了研究, 发现FeLoBALQ的H β 谱线普遍更宽, 意味着FeLoBALQ的观测倾角比较高, 或是缺乏发射低速谱线的气体; 根据发射强度计算吸积率后, 将FeLoBALQ分为低光度低吸积率和高光度高吸积率两种类型^[16]. 该团队使用模型对两种类型FeLoBALQ光谱中宽线吸收现象的实际发生位置进行了研究, 发现对于高光度类型的FeLoBALQ而言, 宽吸收发生地点距类星体中

心的距离与吸积率呈负相关, 而低光度类型则呈正相关^[17]. 该团队将FeLoBALQ与一般类星体的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)进行对比研究发现, FeLoBALQ的发射线及其他参数均与LoBAL类星体和一般类星体存在显著差异, 表明FeLoBALQ可能是一类十分特殊的类星体^[18].

上述系列研究在中等规模的FeLoBALQ样本支撑下, 给出了具有一定普遍性的结果, 但为了验证上述理论是否准确以及为了支持更加系统的FeLoBALQ性质的研究工作, 需要更大规模的FeLoBALQ样本. 本研究的目的就在于, 对FeLoBALQ开展大规模的搜寻与辨别工作, 有效扩充FeLoBALQ样本集, 为FeLoBALQ的系统性研究提供重要的数据支撑, 为星系与活动星系核的协同演化、类星体结构和物理性质、类星体的分类和天体统计等前沿研究提供必要的统计依据.

本文的研究方法为使用机器学习中的卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)方法^[19], 通过输入FeLoBALQ光谱与普通类星体光谱为训练集, 使程序对光谱是否为FeLoBALQ光谱获得鉴别能力, 进而将其运用在已有的SDSS (Sloan Digital Sky Survey)第7次数据释放(Data Release 7, DR7)的类星体样本(Data Release 7 Quasar catalog, DR7Q)^[20]中, 寻找其中尚未被鉴别的FeLoBALQ光谱, 从而为今后对FeLoBALQ的系统性研究提供良好的样本基础. 由于FeLoBALQ的占比较少, 其FeLoBAL吸收特征容易被其他BAL混淆, 为了提高CNN的判别准确度, 减少其他BAL类星体对FeLoBALQ鉴别造成的干扰, 我们将训练样本和目标样本的红移范围限制在 $0.8 < z < 2.125$ 之内, 以便我们关注的静止系波长2000–3200 Å吸收特征全部落在光谱有效范围内.

本文第2章将对我们所使用的训练、目标样本、CNN机器学习方法以及研究开展的过程及重要细节进行介绍. 第3章将对FeLoBALQ辨别的结果以及可能改进之处进行介绍. 第4章将对全文进行总结, 并阐明本文的科学意义, 展望后续可进行的工作.

2 样本及方法

2.1 红移选取及目标样本

我们在前期测试环节, 使用未经处理的光谱进行CNN的训练和鉴别, 发现鉴别结果中被分类为FeLoBALQ的光谱中出现了大量仅有CIV或MgII吸收成分, 未见明显FeII吸收的BAL类星体光谱. 初步分析不同种类BAL的吸收样态较为相近, 除连续吸收产生吸收槽的FeLoBAL之外, 均为类似高斯函数样式的吸收; 再加之红移使吸收线所在的波长可在整条光谱的任意位置, 程序难以判断吸收线是否来自于FeII的吸收, 而非其他元素的吸收.

因此, 我们对训练和目标样本的光谱进行截取, 仅使用可能包含强Fe吸收特征, 保留MgII作为参考, 但CIV、AlIII等干扰特征不明显的静止系波长2000–3200 Å波段进行研究; 该波段的主要流量贡献为类星体连续谱、铁连续发射、MgII宽发射线, 在此之上铁的吸收特征能够被很好凸显, 且除MgII宽吸收线外的其他吸收成分对FeLoBAL判别的干扰较少. 按照SDSS BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)/eBOSS (extended BOSS)光谱波长范围3600–10000 Å计算, 我们取光谱基本完全包含此波段的红移范围 $0.8 < z < 2.125$ 作为限制, SDSS BOSS/eBOSS光谱基本完全涵盖此红移范围的2000–3200 Å静止系波段; 本研究使用的SDSS DR7Q样本中, 红移2左右的类星体光谱的红端静止系波长可能不足3200 Å, 但不足以影响FeLoBALQ的鉴别, 也将其纳入样本, 便于日后在开展对SDSS第16次数据释放类星体表(Data Release 16 Quasar catalog, DR16Q)^[21]的FeLoBALQ研究后, 对DR7Q和DR16Q结果进行对比研究.

我们选用SDSS DR7Q表, 在对红移进行限制后, 共50931条光谱作为目标样本. 此样本作为SDSS的重要阶段性成果, 其良好的科学性已得到验证, 同时样本容量适中, 便于方法的迭代和研究的开展; 同时也可以较方便地将研究扩展到SDSS DR16Q样本.

由于许多类星体光谱信噪比不高, 使用SDSS光谱给出的交集遮罩(and mask)或并集遮罩(or mask)屏蔽光谱坏点时会屏蔽大量有用信息,

因此我们使用标准差截断(σ -clipping)方法屏蔽光谱中的天光线等干扰. 此后, 我们将光谱改至静止系, 截取波长2000–3200 Å波段并重采样为每埃一个数据点(为满足CNN程序所有数据必须等长的需求). 我们对每个数据点减去关于此波段光谱的平均值, 减少连续谱对鉴别的影响, 凸显吸收与发射特征. 最后, 我们在光谱输入CNN之前对其做一次平滑处理, 减轻噪声对判别带来干扰, 凸显宽吸收线等宏观特征.

2.2 训练样本选取

为训练CNN程序, 我们搜集了以往其他团队的研究筛选出的FeLoBALQ^[22–35], 共220个FeLoBALQ源. 我们使用这些FeLoBALQ的SDSS光谱组成训练样本, 在这220个FeLoBALQ源中, 有186个在SDSS中找到对应目标. 将同一源的多次观测光谱统计在内, 我们得到共354条FeLoBALQ光谱, 为保证训练质量, 我们仅保留其中质量较高、铁吸收线明显的光谱, 共剩余319条FeLoBALQ光谱. 在进行 $0.8 < z < 2.125$ 的红移限制后, 样本集共剩余167条光谱. 在验证CNN判别效果的试运行过程中, 我们鉴别出33条FeLoBALQ光谱, 也将其加入至训练样本中以扩充样本容量; 最终训练样本中包含200条FeLoBALQ光谱. 同时, 我们随机挑选了共379条不同质量的非FeLoBAL类星体光谱添加至训练样本中, 用于程序分辨FeLoBALQ的独特特征. 我们使用以上579条光谱作为初步CNN训练的总样本, 并将此样本按约3:1的比例随机划分为两部分, 其中训练集包含153条FeLoBALQ光谱, 282条非FeLoBALQ光谱, 用于进行CNN的训练; 测试集包含47条FeLoBALQ光谱, 97条非FeLoBALQ光谱, 用于判断CNN在经过多少次迭代后获得稳定的鉴别准确率(并采取迭代至这一阶段的CNN模型用于目标样本的判别). 对训练样本中的光谱, 我们也使用了与目标样本相同的数据处理流程.

2.3 CNN结构与训练

我们选择使用CNN这一方法对光谱进行鉴别, 最主要原因是CNN以图像的鉴别见长, 而光谱可视为一个维度的图像. 我们采用了5组卷积层与池化层交叉排列的CNN构建方法, 用于提取光谱中

的特征; 5个卷积层的卷积核容量分别为3、3、5、5、5; 5个池化层的核容量均为2. 之后我们将模型输入两层的全连接层, 采用360和50个隐藏单元的输入分配方式, 用于进行是否为FeLoBALQ的判断. 神经网络中的激活函数使用修正线性单元(Rectified Linear Units, ReLu)^[36–37], 提高对噪声的鲁棒性, 避免训练时梯度消失. 神经网络结构示意图如图1.

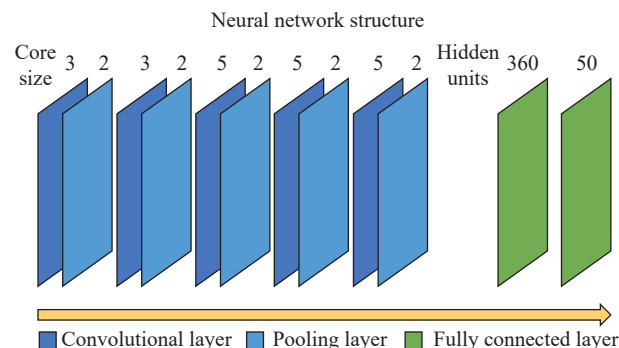


图 1 本研究使用的卷积神经网络结构示意图

Fig. 1 Convolutional neural network structure of this research

将训练样本输入CNN网络, 其中训练集用于训练模型, 测试集用于验证训练结果, 并给模型以反馈. 模型迭代20次后, 对测试集的判定准确率稳定在95%, 因此选择迭代20次的模型对目标样本进行鉴别; 此时的混淆矩阵(confusion matrix)如图2所示.

		Confusion matrix	
True label	FeLoBAL	45	2
	Non-FeLoBAL	5	92
		FeLoBAL	Non-FeLoBAL
		Predicted label	

Accuracy=0.9514, Misclass=0.0486

图 2 CNN模型稳定时(第20次迭代)对验证集测试结果的混淆矩阵

Fig. 2 Confusion matrix towards the test set when CNN stabilized at the 20th iteration

3 结果

我们将上述目标样本输入训练好的CNN模型中, 模型判别了约1000条FeLoBALQ候选体光谱. 我们对这些光谱进行人工鉴别, 将铁的吸收特征较弱、难以判断是否为FeLoBALQ的光谱排除, 并将训练样本中已存在的光谱排除, 得到共160条(包含试运行阶段鉴别出的33条)全新发现的FeLoBALQ

光谱, 其中部分光谱如图3所示. 附录1给出了本研究新发现FeLoBALQ的详细信息, 包括SDSS源名(SDSS Name), 赤经(RA)和赤纬(Dec), SDSS光谱编号(含盘片号Plate、约化儒略日MJD及光纤号Fiber), 红移(z), SDSS u 、 g 、 r 、 i 、 z 波段星等(u 、 g 、 r 、 i 、 z)以及WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) W1和W2波段星等(W1、W2).

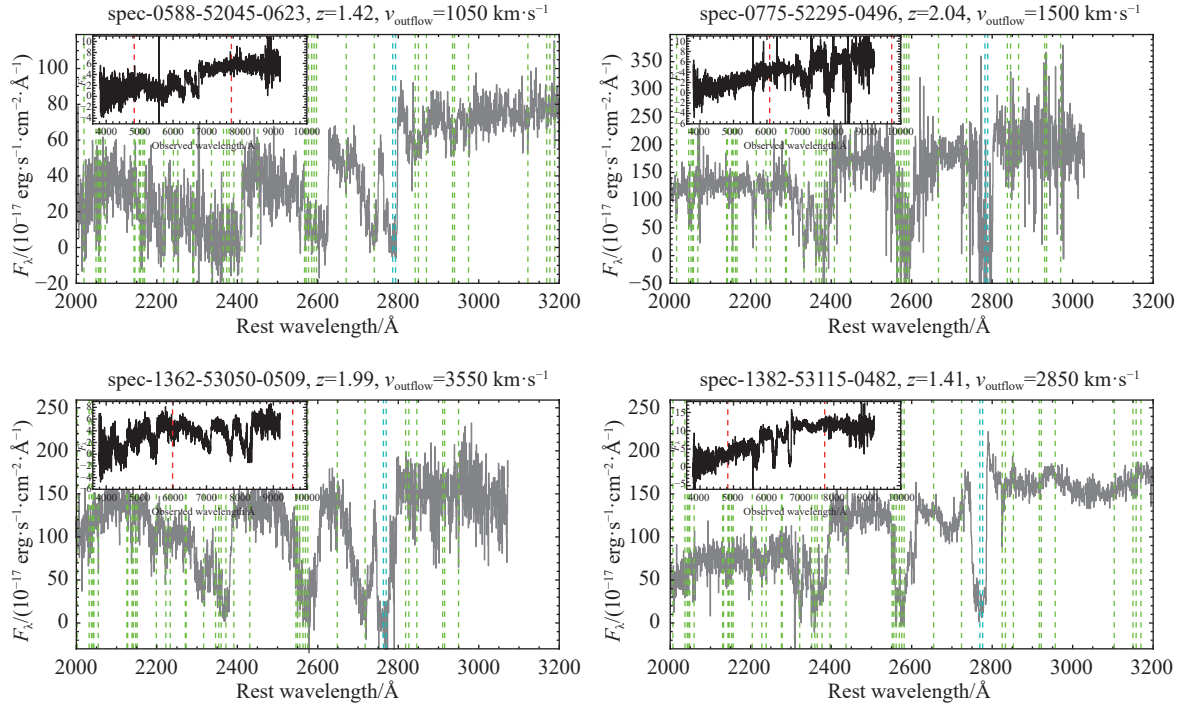


图 3 新发现的4个FeLoBALQ光谱示例. 每张图中, 左上方小图为本地参考系下观测到的完整光谱, 横轴为本地测得的波长, 纵轴 F_{λ} 为本地测得的光谱流量; 红色虚线代表静止系波长2000 Å与3200 Å位置, 即本研究关注的波长范围. 根据每个FeLoBALQ的红移值 z 转换至静止参考系后, 主图为静止系该波长范围的光谱细节, 也是本研究中CNN所使用的部分; 横轴为静止系下的波长, 纵轴 F_{λ} 为转换为静止系的光谱流量. 主图中绿色及青色虚线为Hall等^[24]在其论文表1中给出的吸收线(其中青色为MgII吸收, 为BAL的标志性特征), 但位置相较该表中的波长位置有整体性蓝移, 蓝移速度即外流速度 v_{outflow} 在各图标题中给出. 该表给出的吸收线不能完全符合各光谱中的吸收特征, 且同一吸收线在不同光谱中的吸收强度及展宽不同, 导致不同FeLoBALQ光谱有着不同的吸收轮廓, 难以使用一般方法进行鉴别, 因此使用机器学习方法进行鉴别有其必要性.

Fig. 3 Example spectra of 4 newly identified FeLoBALQs in this research. Subplots show the spectra in local frame, showing the local frame flux F_{λ} over local observed wavelength. Red dashed lines represent 2000 Å and 3200 Å in rest frame, the wavelength range limits we decided for FeLoBALQ identification. With transferred into rest frame using redshift z of these FeLoBALQs, the main plots show the spectra in rest frame which are used in the CNN program, showing the calculated rest frame flux F_{λ} over rest observed wavelength, in decided wavelength range for detail. Green and cyan dashed lines represent absorption lines given in Table 1 in Hall et al.^[24], but all blueshifted respected to the original wavelength, with the blueshift velocities i.e. the outflow velocities v_{outflow} given in the titles. These absorption lines cannot explain all the absorption features, and the strengths and widths of absorption lines are different among the FeLoBALQ spectra, resulting in different absorption profiles. Regular methods are hard to identify these features, therefore it's necessary to adopt machine learning methods into FeLoBALQ identification.

我们以目标样本(SDSS DR7Q $0.8 < z < 2.125$ 的类星体)与训练样本(仅先前研究发现的FeLoBALQ, 不包含试运行阶段鉴别出的FeLoBALQ)作为对照, 对新发现的160个FeLoBALQ候选体绘制了颜色-颜色图, 如图4所示. 由于3个样本均基本处在非银道面方向、受银河系消光影响小, 且3个样本的红移区间相同且红移范围不大, 因此通过直接采用观测星等计算颜色的方式进行统计研究. 相对于目标样本而言, 我们发现FeLoBALQ总体偏红, 且在偏蓝的波段内, 两者的颜色差异更明显, 中红外的W1-W2颜色上几乎没有区别. 在物理原因上, 类星体光谱越靠近蓝端, 其连续谱的贡献就越大,

而FeLoBALQ中的气体外流对连续谱的消光效应就越显著, 颜色也会更加偏红. 图4的结果支持上述理论. 新发现的FeLoBALQ与先前研究发现的FeLoBALQ分布相似, 但先前发现的FeLoBALQ总体稍微偏红, 这一点可以用以下理论来解释: FeLoBALQ外流的吸收作用越强, 其颜色就会越红; 吸收作用更强的FeLoBALQ, 在光谱中能够观测到更加明显的吸收簇、吸收槽, 因此得以在更早的研究中发现, 导致其整体偏红; 而吸收作用偏弱的FeLoBALQ, 一般更晚被发现, 因此占本研究新发现候选体的比例更大.

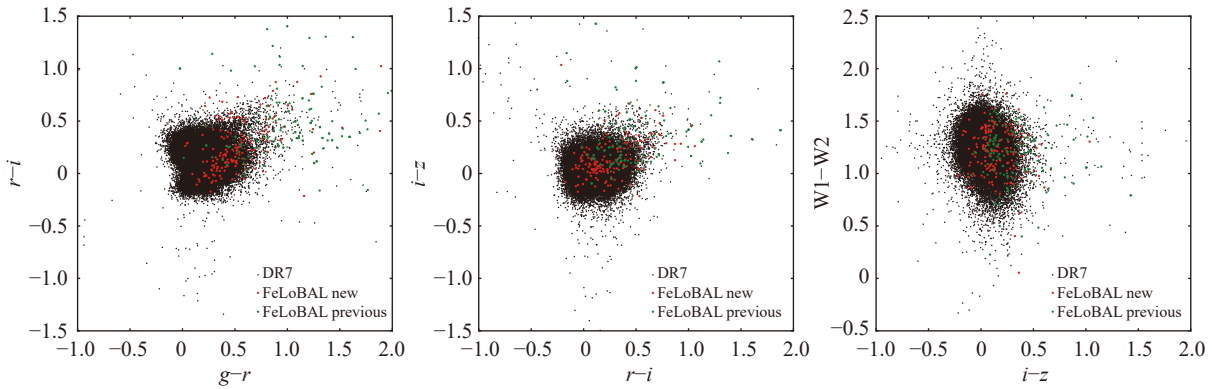


图 4 $0.8 < z < 2.125$ 内 FeLoBALQ 与目标样本(SDSS DR7Q)的颜色-颜色图, 使用 SDSS g 、 r 、 i 、 z 波段星等 g 、 r 、 i 、 z 以及 WISE W1 和 W2 波段星等 W1、W2, 得到 4 种颜色用于统计研究. 其中红色点代表本文新发现的 FeLoBALQ, 绿色点代表以往发现的 FeLoBALQ, 黑色代表目标样本. FeLoBALQ 总体比其他类星体更红, 而先前发现的 FeLoBALQ 比本次发现的稍微偏红; 此现象在蓝端比红端更明显, 而在中红外波段的 W1-W2 颜色几乎没有区别.

Fig. 4 Color-color diagram for FeLoBALQs and SDSS DR7Q in $0.8 < z < 2.125$ for statistical researching, using 4 colors calculated with SDSS g , r , i , z band magnitude g , r , i , z and WISE W1, W2 band magnitude W1, W2. Red dots represent FeLoBALQs newly identified in this research, green dots represent FeLoBALQs identified in previous research, and black dots represent quasars in DR7Q. FeLoBALQs can be found redder than other quasars, and previously identified FeLoBALQs lightly redder than newly identified ones; these phenomena can be found more obvious on bluer end than on redder end, and the color differences nearly disappear in mid-infrared W1-W2.

训练样本中属于SDSS DR7Q的光谱共61条, 目前在SDSS DR7Q $0.8 < z < 2.125$ 范围内发现的FeLoBALQ光谱合计221条; 占总数50931条光谱的0.43%, 略高于Trump等^[26]在2006年得到的0.33%的比例. 我们认为真实的FeLoBALQ占类星体总数的比例应大于这个数值. 原因之一是FeLoBALQ相比其他类星体光谱更红, 且由于外流吸收消光的作用导致在地球参考系的光学和近红外波段更

暗, 更容易与褐矮星混淆, 因此在光学选源阶段遗漏. 原因之二是FeLoBALQ的光谱由于吸收特征剧烈而难以确认其天体分类(例如训练样本中的FeLoBALQ就有一部分被SDSS归类为星系)以及红移, 更易在光谱样本选取阶段逃离目标样本.

4 总结与展望

在本文中, 我们使用目前已经发现的FeLoBALQ

光谱作为训练样本, 建立了进行FeLoBALQ鉴别分类的CNN模型. 我们根据FeLoBALQ的吸收特征, 确定了本研究中目标类星体的红移范围为 $0.8 < z < 2.125$. 我们对范围内的所有SDSS DR7Q共50931条类星体光谱进行了分类, 共获得160个新的FeLoBALQ候选体, 并给出该红移段的FeLoBALQ占比为0.43%. 我们简要分析了FeLoBALQ相较其他类星体偏红的原因以及研究中可能存在的统计性偏差的成因.

未来的工作将包括不断改进程序与CNN结构、完善训练样本, 并将FeLoBALQ的鉴别工作扩展到SDSS DR16Q相同红移段内, 全部共330386条光谱的样本中(其中不包含SDSS DR7Q的光谱279455条). 按照0.43%的比例, 我们预计在样本中发现约1400条FeLoBALQ光谱, 其中约1100条为新证认的FeLoBALQ光谱, 以此充实现有的FeLoBALQ源表, 为相关研究提供数据支撑.

此外, 我们计划对样本中的FeLoBALQ进行一系列高分辨图像、光谱以及多波段测光观测. 通过高分辨图像的观测, 寻找FeLoBALQ的宿主星系中主并合出现的迹象, 将解答FeLoBALQ是否主要由主并合触发的问题. 通过高分辨率光谱观测以及多波段的测光观测, 将对候选体提供更精准的证认, 并确定其黑洞质量、热光度、外流速度及强度、宿主星系恒星形成率等各类参数. 对这些收集到的物理性质进行分析, 将有助于解答FeLoBALQ是否与ULIRG伴生、是否为ULIRG向类星体演化的某一阶段等问题. 另外, 通过比较不同红移上FeLoBALQ的物理性质, 我们将探讨FeLoBALQ的产生几率是否与红移即宇宙年龄相关, 这对理解星系与中心黑洞协同演化具有重要意义.

致谢 本研究使用了SDSS与WISE项目提供的优质数据, 使用了ADS与arXiv论文数据库以及CDS数据库用于资料搜寻和样本搜集, 使用了topcat以及asera软件进行数据表处理和光谱查看, 使用了numpy、scipy、pytorch、astropy、specutils等程序包. 在此对以上项目、数据库及软件一并表示感谢. 感谢审稿人为本文提出宝贵的审稿意见. 感谢李阮存对本文提供的宝贵建议.

参考文献

- [1] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433: 604
- [2] Debuhr J, Quataert E, Ma C P. *MNRAS*, 2011, 412: 1341
- [3] Moe M, Arav N, Bautista M A, et al. *ApJ*, 2009, 706: 525
- [4] Faucher-Giguère C A, Quataert E, Murray N. *MNRAS*, 2012, 420: 1347
- [5] Yuan M J, Wills B J. *ApJ*, 2003, 593: L11
- [6] Runnoe J C, Ganguly R, Brotherton M S, et al. *MNRAS*, 2013, 433: 1778
- [7] Schulze A, Schramm M, Zuo W, et al. *ApJ*, 2017, 848: 104
- [8] Rankine A L, Hewett P C, Banerji M, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 4553
- [9] Farrah D, Urrutia T, Lacy M, et al. *ApJ*, 2010, 717: 868
- [10] Farrah D, Surace J A, Veilleux S, et al. *ApJ*, 2005, 626: 70
- [11] Farrah D, Lacy M, Priddey R, et al. *ApJ*, 2007, 662: L59
- [12] Lawther D, Vestergaard M, Fan X. *MNRAS*, 2018, 475: 3213
- [13] Violino G, Coppin K E K, Stevens J A, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 1371
- [14] Villforth C, Herbst H, Hamann F, et al. *MNRAS*, 2019, 483: 2441
- [15] Choi H, Leighly K M, Terndrup D M, et al. *ApJ*, 2022, 937: 74
- [16] Leighly K M, Choi H, DeFrancesco C, et al. *ApJ*, 2022, 935: 92
- [17] Choi H, Leighly K M, Dabbieri C, et al. *ApJ*, 2022, 936: 110
- [18] Leighly K M, Choi H, Eracleous M, et al. *ApJ*, 2024, 966: 87
- [19] LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86: 2278
- [20] Schneider D P, Richards G T, Hall P B, et al. *AJ*, 2010, 139: 2360
- [21] Lyke B W, Higley A N, McLane J N, et al. *ApJS*, 2020, 250: 8
- [22] Becker R H, White R L, Gregg M D, et al. *ApJ*, 2000, 538: 72
- [23] White R L, Becker R H, Gregg M D, et al. *ApJS*, 2000, 126: 133
- [24] Hall P B, Anderson S F, Strauss M A, et al. *ApJS*, 2002, 141: 267
- [25] Reichard T A, Richards G T, Schneider D P, et al. *AJ*, 2003, 125: 1711

- [26] Trump J R, Hall P B, Reichard T A, et al. ApJS, 2006, 165: 1
- [27] Urrutia T, Becker R H, White R L, et al. ApJ, 2009, 698: 1095
- [28] Meusinger H, Schalldach P, Scholz R, et al. A&A, 2012, 541: A77
- [29] Bruni G, González-Serrano J I, Pedani M, et al. A&A, 2014, 569: A87
- [30] Zhang S, Zhou H, Wang T, et al. ApJ, 2015, 803: 58
- [31] Dunn J P, Wasik B, Holtzclaw C L, et al. ApJ, 2015, 808: 94
- [32] McGraw S M, Shields J C, Hamann F W, et al. MNRAS, 2015, 453: 1379
- [33] Krogager J, Fynbo J P U, Heintz K E, et al. ApJ, 2016, 832: 49
- [34] Reis I, Poznanski D, Hall P B. MNRAS, 2018, 480: 3889
- [35] Schindler J T, Fan X, Huang Y H, et al. ApJS, 2019, 243: 5
- [36] Hahnloser R H R, Sarpeshkar R, Mahowald M A, et al. Nature, 2000, 405: 947
- [37] Glorot X, Bordes A, Bengio Y. JMLR, 2011, 15: 315

Identifying FeLoBAL Quasars in SDSS DR7Q with the Convolutional Neural Network

HE Zi-qi^{1,2} FU Yu-ming^{3,4} WU Xue-bing^{1,2} HE Ling-xue⁵

(1 Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

(2 Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871)

(3 Leiden Observatory, Leiden University, Leiden NL-2300 RA)

(4 Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, Groningen NL-9700 AV)

(5 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 1138656)

ABSTRACT The Fe Low-ionization Broad Absorption Line Quasar (FeLoBALQ) is one of the rarest types of all quasars. Quasars blow out the surrounding violently, forming extreme outflows from which low ionized elements e.g. Fe provide the absorbing feature in FeLoBALQ spectra. Carrying high kinetic energy, the outflows of FeLoBALQ may possibly be enough for powering the $M - \sigma_*$ relationship between the supermassive black hole mass M and the host-galaxy bulge velocity dispersion σ_* . On the other hand, evidence has been found for the co-existence of FeLoBALQ with hosts' starburst or recent major merger. However, the FeLoBALQ sample collected so far is not large enough to stand for these theories statistically. This research focuses on digging out hidden FeLoBALQs from large quasar surveys, forming a FeLoBALQ catalog large enough for statistical and physical analyze. Adopting Convolutional Neural Network (CNN) method, 160 FeLoBALQs are newly identified from totally 50931 quasars in the SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR7Q (Data Release 7 Quasar catalog) in the redshift range of $0.8 < z < 2.125$, with previous identified FeLoBALQ spectra as training sample. The FeLoBALQs' color are found redder than normal quasars, and previously identified FeLoBALQs are lightly redder than newly identified ones; these differences are more obvious on bluer end than on redder end, and nearly disappear in mid-infrared band. The proportion of FeLoBALQs out of all quasars given is 0.43%, higher than previous prediction, but may still be underestimated. Further researches may expand this method to larger samples e.g. SDSS DR16Q (Data Release 16 Quasar catalog) for larger FeLoBALQ sample, which may help to answer the questions of the relationship between FeLoBALQ and host galaxy star formation, FeLoBALQ and galaxy major merger, and the co-evolution of galaxies and central supermassive black holes.

Key words galaxies: active, quasars: absorption lines, methods: deep learning, catalogs

附录

1 新发现的FeLoBALQ源表

表 1 新发现的FeLoBALQ源表
Table 1 FeLoBALQs newly identified

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	z	SDSS u	SDSS g	SDSS r	SDSS i	SDSS z	WISE W1	WISE W2
J1050-0105	162.5987	-1.0988	276	51909	292	1.54	20.29	19.83	19.32	19.21	19.34	16.06	15.06
J1055+0020	163.8653	0.3338	276	51909	557	1.15	19.75	19.40	18.91	18.78	18.78	15.15	14.17
J1240+0017	190.1199	0.2850	290	51941	635	1.14	19.17	18.84	18.44	18.41	18.47	14.96	13.62
J1310+0104	197.5286	1.0743	294	51986	609	1.31	18.42	17.94	17.66	17.62	17.61	14.25	12.81
J1316-0036	199.1553	-0.6100	295	51985	080	0.93	19.16	18.40	18.08	18.05	17.86	14.34	13.22
J1339+0009	204.9391	0.1628	298	51955	639	1.88	19.23	19.20	19.18	18.91	18.83	15.81	14.62
J1447-0034	221.8142	-0.5677	308	51662	170	1.24	19.68	19.20	18.60	18.51	18.48	14.61	13.38
J1209+0045	182.3844	0.7655	323	51615	370	1.45	18.42	17.63	17.12	17.00	17.04	13.83	12.55
J2336-0107	354.1490	-1.1260	384	51821	011	1.30	19.89	19.66	19.35	19.42	19.36	15.65	14.61
J0338+0056	54.5452	0.9382	415	51810	617	1.63	20.61	19.53	18.61	18.36	18.47	15.83	14.32
J0156+1352	29.1501	13.8701	427	51900	354	1.13	20.21	19.90	19.22	18.99	18.89	14.16	12.62
J0207+1429	31.7576	14.4997	427	51900	602	1.02	20.41	19.85	19.52	19.43	19.39	16.12	15.05
J0805+4535	121.3853	45.5966	439	51877	321	1.56	19.52	18.98	18.57	18.34	18.30	15.08	13.93
J0242-0722	40.7278	-7.3682	456	51910	378	1.22	19.78	19.42	18.90	18.71	18.69	14.38	13.12
J0918+5833	139.7270	58.5610	484	51907	598	1.32	20.38	19.97	19.54	19.19	18.95	15.44	14.41
J0948+6214	147.1910	62.2408	486	51910	607	1.54	21.55	20.56	20.11	19.54	19.49	15.77	14.55
J1239+0235	189.8984	2.5841	521	52326	235	1.31	20.03	19.55	18.95	18.91	18.73	15.60	14.79
J1010+5723	152.5962	57.3918	558	52317	032	1.89	21.09	20.29	19.40	18.85	18.32	15.19	13.95
J1020+0330	155.0584	3.5038	574	52355	017	1.73	18.77	18.61	18.57	18.28	18.27	15.14	13.70
J1056+0549	164.0344	5.8201	580	52368	322	1.33	20.39	20.11	19.73	19.58	19.51	15.75	14.34
J1457+0426	224.3734	4.4488	588	52045	623	1.42	23.27	21.39	20.58	18.98	18.65	14.66	13.31
J1420+6047	215.0429	60.7896	606	52365	110	1.35	22.26	20.68	19.85	19.21	19.05	15.27	14.01
J1628+4755	247.0228	47.9297	625	52145	127	1.52	19.79	19.63	19.26	19.07	19.23	15.73	14.32
J1649+4014	252.4245	40.2489	630	52050	482	1.27	20.04	18.94	18.18	17.85	17.99	14.64	13.24
J2347-1037	356.7977	-10.6285	648	52559	098	1.82	18.85	18.01	17.35	17.04	16.91	13.88	12.41
J2357-0903	359.3263	-9.0540	650	52143	321	1.18	19.89	19.63	19.33	19.25	19.21	15.74	14.41
J0102-0853	15.7069	-8.8957	658	52146	562	1.68	18.82	18.49	18.10	17.76	17.62	14.52	13.52

表1 续
Table 1 Continued

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	z	SDSS u	SDSS g	SDSS r	SDSS i	SDSS z	WISE W1	WISE W2
J0121-0929	20.3634	-9.4847	660	52177	635	1.47	20.77	20.52	19.99	19.26	18.89	16.08	15.45
J2137+1041	324.3145	10.6864	731	52460	076	1.58	22.19	21.12	20.02	19.15	19.02	15.56	14.07
J2204+1327	331.0915	13.4561	735	52519	321	1.70	19.06	18.85	18.66	18.29	18.36	14.87	13.53
J0026+1355	6.5991	13.9232	753	52233	002	1.32	20.21	19.26	18.74	18.65	18.64	15.09	13.65
J1120+6204	170.0069	62.0832	775	52295	496	2.04	25.00	20.98	19.46	19.02	18.36	14.92	13.89
J1202+6317	180.5080	63.2998	778	52337	362	1.48	20.14	19.86	19.34	19.09	18.97	16.05	14.98
J1448+5639	222.1614	56.6553	791	52435	103	1.67	21.84	20.65	20.39	19.66	19.18	15.94	15.02
J1534+5147	233.6083	51.7924	795	52378	140	1.77	19.64	19.45	18.99	18.46	18.34	14.77	13.74
J1530+5115	232.6190	51.2540	795	52378	279	1.94	19.46	19.26	19.21	18.92	18.87	15.41	14.15
J1233+0608	188.3692	6.1423	845	52381	530	1.19	18.83	18.42	18.16	18.20	18.13	14.42	13.00
J1319+0550	199.9602	5.8458	851	52376	524	1.06	20.36	19.93	19.28	18.99	18.89	15.68	14.76
J1337+0527	204.4713	5.4629	853	52374	531	1.74	19.55	19.21	18.68	18.14	17.83	15.15	14.07
J1344-0158	206.2090	-1.9786	913	52433	381	0.96	19.85	19.31	19.02	19.00	18.75	14.69	13.59
J1348-0153	207.1283	-1.8994	914	52721	353	0.82	20.19	19.58	19.15	19.08	18.94	15.03	13.81
J1527-0210	231.8533	-2.1820	924	52409	003	1.17	20.13	20.04	19.54	19.47	19.49	15.68	14.35
J0743+2209	115.8371	22.1625	927	52577	003	2.06	20.13	19.81	19.43	18.75	18.14	15.60	14.73
J1010+4518	152.7249	45.3047	943	52376	507	1.78	19.65	18.43	17.63	17.21	16.92	13.36	12.24
J1011+5712	152.8634	57.2049	946	52407	321	1.15	18.07	18.08	17.93	17.98	18.16	14.94	13.57
J1006+0513	151.5236	5.2303	996	52641	243	0.97	20.15	19.51	18.89	18.67	18.30	13.31	12.03
J0801+3153	120.4164	31.8916	1061	52641	479	1.66	19.24	18.87	18.45	18.24	18.33	15.87	15.00
J2140-0653	325.0573	-6.8969	1177	52824	406	1.72	21.90	20.37	19.82	19.29	18.93	15.00	13.47
J0834+0613	128.6812	6.2261	1187	52708	341	1.44	19.78	19.34	19.03	18.87	18.85	16.03	14.76
J1145+1100	176.4844	11.0051	1226	52734	375	0.94	19.95	19.34	18.98	18.81	18.56	15.21	14.31
J1041+0925	160.4975	9.4231	1240	52734	589	1.23	20.31	19.97	19.30	19.17	19.06	15.62	14.73
J0811+2452	122.7508	24.8753	1265	52705	540	1.07	20.75	20.12	19.84	19.76	19.63	15.89	14.85
J0912+3515	138.1266	35.2607	1273	52993	371	1.05	19.48	18.96	18.82	18.93	18.89	15.91	14.79
J1302+4859	195.7349	48.9979	1281	52753	306	0.87	18.77	18.30	18.07	18.09	17.94	14.16	12.95
J1333+4916	203.4295	49.2731	1283	52762	411	1.39	19.89	19.76	19.00	18.98	18.89	15.59	14.57
J0912+0915	138.2305	9.2574	1301	52976	325	1.35	19.60	19.42	19.00	18.89	18.86	15.24	13.89
J1239+5755	189.8757	57.9288	1316	52790	623	0.97	19.19	18.51	18.07	17.97	17.82	14.51	13.54
J1359+5532	209.7715	55.5383	1324	53088	331	1.21	19.04	18.41	18.14	18.31	18.39	15.64	14.46

表1 续
Table 1 Continued

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	z	SDSS u	SDSS g	SDSS r	SDSS i	SDSS z	WISE W1	WISE W2
J1054+4428	163.5484	44.4790	1362	53050	509	1.99	22.11	20.54	19.38	19.59	18.56	15.20	13.89
J1440+3710	220.0093	37.1829	1382	53115	482	1.41	23.18	20.30	18.99	18.06	17.78	13.94	12.70
J1155+4659	178.7997	46.9844	1446	53080	161	1.30	19.73	19.21	18.74	18.62	18.62	14.68	13.25
J0003+0010	0.7639	0.1721	1489	52991	597	1.52	21.33	20.91	20.72	20.48	20.48	17.11	15.35
J1646+1943	251.7298	19.7169	1569	53168	135	1.95	20.96	20.14	19.65	19.12	19.33	15.83	14.86
J1612+2516	243.1798	25.2691	1575	53493	311	1.81	19.16	19.40	19.18	18.73	18.59	15.62	14.79
J1617+2509	244.4265	25.1595	1576	53496	249	1.79	19.44	18.95	18.12	17.68	17.78	14.87	14.01
J1539+3205	234.9968	32.0863	1581	53149	197	1.51	20.07	19.80	19.51	19.09	18.71	15.68	14.30
J1547+3230	236.9257	32.5133	1581	53149	637	1.31	20.30	20.44	20.08	20.11	19.99	15.73	14.69
J0823+2446	125.9606	24.7814	1585	52962	639	1.77	20.71	20.19	19.45	18.79	18.54	14.65	13.24
J1539+0737	234.9619	7.6300	1724	53859	252	1.10	20.97	19.68	19.09	19.14	19.10	15.14	13.76
J1610+0713	242.5280	7.2215	1729	53858	637	1.35	19.72	19.34	19.04	18.98	18.88	15.17	13.77
J0743+4357	115.9192	43.9516	1736	53052	148	1.86	21.19	20.17	18.94	18.18	17.63	13.44	12.27
J0949+1237	147.4285	12.6292	1743	53054	355	1.67	19.73	19.29	18.72	18.43	18.49	15.44	14.24
J1022+1301	155.7053	13.0236	1746	53062	151	1.22	22.17	20.80	19.55	19.13	18.77	14.23	12.62
J1043+1327	160.8329	13.4635	1749	53357	280	1.46	20.65	19.48	18.51	18.06	17.80	14.08	12.98
J1102+1438	165.5593	14.6479	1751	53377	350	1.37	19.57	18.99	18.48	18.37	18.28	14.45	13.12
J0832+0758	128.1919	7.9703	1758	53084	035	1.90	19.89	19.55	19.08	18.50	18.17	15.41	15.01
J0825+0652	126.2604	6.8801	1758	53084	284	1.45	20.79	20.42	19.86	19.54	19.29	14.88	13.12
J1222+1423	185.6569	14.3975	1766	53468	030	1.01	19.59	19.27	18.90	18.84	18.61	15.08	13.69
J1336+0830	204.1352	8.5167	1801	54156	530	0.81	19.31	18.74	18.34	18.23	18.13	14.44	13.36
J1335+1018	203.8563	10.3108	1802	53885	410	1.11	—	—	—	—	—	—	—
J1432+0547	218.0984	5.7919	1827	53531	064	0.99	19.63	19.09	18.89	18.88	18.68	15.53	14.32
J1507+2906	226.7806	29.1020	1845	54144	311	1.07	18.83	18.19	17.99	18.01	17.87	14.90	13.81
J1543+2640	235.7635	26.6812	1849	53846	577	1.92	21.44	19.86	18.61	18.41	17.91	15.16	14.13
J1553+2358	238.4001	23.9767	1850	53786	102	0.92	19.67	19.32	18.51	18.30	18.02	14.93	14.02
J1548+2432	237.1518	24.5477	1850	53786	319	1.38	19.84	19.60	19.30	19.18	19.14	15.56	14.16
J1551+2544	237.7571	25.7400	1850	53786	544	1.35	20.04	19.95	19.26	19.21	19.06	15.35	14.23
J0800+1943	120.0628	19.7332	1922	53315	474	1.25	20.64	19.69	18.75	18.44	18.39	14.77	13.34
J1022+3459	155.5697	34.9916	1957	53415	221	1.94	21.51	20.39	19.38	18.73	18.36	15.11	14.15
J1029+3701	157.4323	37.0242	1957	53415	601	1.34	20.44	20.47	20.05	19.79	19.82	16.05	14.79

表1 续
Table 1 Continued

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	z	SDSS u	SDSS g	SDSS r	SDSS i	SDSS z	WISE W1	WISE W2
J1326+2839	201.5101	28.6660	1978	53473	318	1.73	20.68	19.98	19.77	19.12	18.74	15.20	14.04
J1232+4106	188.0754	41.1105	1984	53433	363	1.33	20.25	19.60	19.08	18.86	18.83	15.80	14.57
J1234+3839	188.6472	38.6542	1992	53466	585	1.85	19.09	18.83	18.47	17.93	17.62	14.83	13.94
J1147+3734	176.9181	37.5775	1997	53442	143	1.30	21.70	20.26	19.32	18.99	18.78	14.18	12.72
J1306+3258	196.6789	32.9676	2006	53476	018	1.43	19.74	19.60	19.12	19.01	18.92	15.63	14.54
J1245+3412	191.3790	34.2026	2020	53431	639	1.25	19.59	19.37	18.95	18.77	18.70	14.98	13.48
J0206+2227	31.5946	22.4512	2046	53327	433	1.70	18.13	17.50	16.99	16.77	16.84	14.04	13.04
J0133+2333	23.4287	23.5521	2064	53341	318	0.91	19.51	18.84	18.53	18.55	18.31	14.54	13.29
J1409+2729	212.2780	27.4947	2120	53852	620	1.93	22.76	21.95	20.06	19.03	18.58	14.77	13.40
J1635+1415	248.8957	14.2657	2204	53877	441	1.44	19.00	18.31	17.83	17.61	17.57	13.80	12.22
J1215+2934	183.9463	29.5694	2232	53827	314	1.53	19.75	19.06	18.46	17.93	17.67	14.35	13.16
J1230+2759	187.7432	27.9901	2235	53847	463	0.95	21.76	21.53	19.65	19.24	18.85	15.05	13.71
J1248+2846	192.1400	28.7691	2239	53726	205	1.60	20.58	19.69	18.89	18.51	18.18	14.29	13.09
J0813+1345	123.3874	13.7543	2270	53714	272	1.62	20.80	19.29	18.53	18.12	17.95	14.58	13.44
J0033+0632	8.3985	6.5354	2327	53710	256	1.50	19.95	19.25	18.69	18.32	18.27	14.23	12.78
J1017+2303	154.3460	23.0562	2346	53734	090	1.72	—	—	—	—	—	—	—
J1000+2006	150.2145	20.1102	2363	53763	029	1.49	20.89	20.19	19.60	19.10	19.03	15.59	14.20
J1022+2158	155.6002	21.9758	2365	53739	625	1.17	18.86	18.61	18.27	18.14	18.09	14.32	12.97
J0249+3320	42.4427	33.3497	2378	53759	281	1.29	19.70	18.75	18.09	17.87	17.75	14.27	12.82
J1042-0008	160.6780	-0.1392	2409	54210	285	1.45	20.81	19.68	19.10	18.74	18.64	15.00	13.38
J1045+2210	161.2578	22.1779	2477	54058	054	1.15	18.36	17.80	17.37	17.23	17.16	13.25	11.79
J1050+2004	162.6271	20.0728	2482	54175	372	1.65	21.00	19.62	18.76	18.23	17.87	15.19	15.13
J1114+2222	168.5054	22.3699	2492	54178	536	2.12	19.42	18.76	18.37	18.20	17.76	14.75	13.73
J1133+2231	173.2800	22.5186	2500	54178	573	1.39	19.83	19.38	19.01	18.66	18.55	15.02	13.80
J1632+0942	248.0821	9.7132	2532	54589	635	1.31	19.84	18.93	18.53	18.34	18.30	14.81	13.35
J0849+1125	132.3015	11.4273	2574	54084	371	1.33	20.68	20.19	19.47	19.08	18.84	14.24	12.80
J1209+1651	182.2910	16.8590	2595	54207	025	1.04	19.32	19.09	18.87	18.88	18.70	14.98	13.67
J1214+1749	183.6254	17.8187	2596	54207	501	1.05	19.85	19.26	18.97	18.98	18.86	15.16	13.94
J1227+1750	186.9019	17.8497	2598	54232	463	1.17	18.18	17.59	17.23	17.21	17.26	13.72	12.56
J1259+2057	194.7994	20.9606	2616	54499	373	1.25	19.19	19.13	19.04	19.04	19.14	15.38	14.27
J1305+1932	196.4866	19.5444	2616	54499	627	1.50	20.38	20.03	19.60	19.20	19.06	15.82	14.33

表1 续
Table 1 Continued

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	z	SDSS u	SDSS g	SDSS r	SDSS i	SDSS z	WISE W1	WISE W2
J1334+2004	203.5659	20.0771	2641	54230	536	1.07	21.10	20.03	19.35	19.16	18.83	14.79	13.74
J1247+2323	191.9088	23.3933	2648	54485	612	1.51	19.96	19.70	19.20	18.92	18.83	15.51	14.48
J1316+2507	199.0522	25.1236	2663	54234	581	0.98	22.23	20.72	20.21	20.05	20.00	17.62	18.35
J1338+2246	204.6095	22.7751	2666	54230	299	1.18	18.74	18.44	18.20	18.09	17.98	13.85	12.35
J1439+1535	219.9281	15.5876	2748	54234	527	1.72	21.59	20.23	19.34	18.47	18.18	14.63	13.16
J1524+1153	231.0966	11.8867	2753	54234	055	1.42	20.87	19.78	18.99	18.47	18.42	15.12	13.67
J1417+1743	214.2783	17.7187	2759	54534	382	1.28	20.46	19.40	18.58	18.19	17.89	13.50	12.13
J1533+1500	233.4245	15.0165	2768	54265	450	1.43	23.53	22.76	20.56	19.50	19.24	15.43	14.13
J1500+1648	225.0874	16.8152	2778	54539	012	1.12	19.17	18.52	18.01	18.01	17.97	14.40	12.99
J1533+5650	233.3126	56.8458	2883	54525	637	1.22	20.50	20.35	19.97	20.02	20.05	15.92	14.81
J1059+0934	164.8402	9.5696	2886	54498	639	1.20	19.70	19.42	19.26	19.33	19.25	15.90	14.99
J0753+0822	118.3232	8.3757	2945	54505	243	1.39	19.48	18.61	18.31	18.08	18.19	15.41	14.17
J0925+3251	141.4070	32.8502	2961	54550	035	1.37	20.97	20.99	20.71	20.78	20.90	16.61	15.65
J0921+3243	140.4516	32.7330	2961	54550	102	1.39	20.85	20.71	20.52	20.40	20.37	16.77	15.80
J0914+3253	138.6990	32.8908	2961	54550	400	1.36	21.53	20.95	20.41	20.15	20.10	15.85	14.62
J1035-0029	158.9373	-0.4902	273	51957	069	2.08	20.27	19.62	19.07	18.80	18.53	15.03	13.66
J1053-0058	163.4703	-0.9813	276	51909	139	1.57	19.02	18.41	17.95	17.57	17.48	14.27	12.96
J1056+0012	164.0902	0.2121	276	51909	551	1.71	21.58	20.86	20.50	19.99	19.87	15.66	14.23
J1104-0004	166.1701	-0.0782	277	51908	077	1.35	19.98	19.32	18.99	18.94	18.88	15.41	14.12
J1107-0051	166.8686	-0.8563	278	51900	214	1.73	21.36	20.68	19.63	19.03	18.70	14.42	13.01
J1133-0057	173.4220	-0.9611	282	51658	215	1.70	21.09	20.18	19.39	18.67	18.30	14.24	12.79
J1158-0043	179.7203	-0.7172	285	51930	189	0.98	21.63	20.50	19.70	19.38	18.83	14.53	13.55
J1607+0058	241.9956	0.9763	345	51690	363	1.79	20.79	19.95	19.64	19.10	18.85	15.40	14.18
J1716+6434	259.0158	64.5730	350	51691	145	1.53	18.31	17.78	17.31	17.18	17.24	14.72	13.74
J1723+6547	260.8089	65.7962	350	51691	604	1.44	17.63	17.35	16.94	16.87	16.87	14.02	12.93
J1733+5520	263.3785	55.3419	358	51818	127	1.20	19.88	19.21	18.71	18.46	18.15	14.52	13.31
J1729+5547	262.2890	55.7857	358	51818	284	1.43	19.24	19.24	18.69	18.51	18.38	15.44	14.39
J1725+5254	261.2527	52.9139	359	51821	139	1.36	19.52	19.42	19.15	19.24	19.04	15.70	14.37
J1736+5855	264.2424	58.9172	366	52017	638	1.62	21.86	20.92	20.03	19.55	19.24	15.62	14.44
J2339-0029	354.8934	-0.4924	385	51877	221	2.03	21.78	20.81	20.19	19.85	19.28	15.71	14.43
J0321-0013	50.4635	-0.2230	413	51929	102	1.15	20.30	20.09	19.61	19.67	19.78	15.65	14.57

表1 续
Table 1 Continued

SDSS Name	RA/°	Dec/°	SDSS Plate	SDSS MJD	SDSS Fiber	<i>z</i>	SDSS <i>u</i>	SDSS <i>g</i>	SDSS <i>r</i>	SDSS <i>i</i>	SDSS <i>z</i>	WISE W1	WISE W2
J0925+0136	141.2972	1.6053	475	51965	310	1.80	18.38	18.31	17.95	17.54	17.47	14.14	13.08
J1235+0132	188.9581	1.5480	520	52288	001	1.29	21.40	20.81	19.94	19.16	18.87	14.96	13.99
J0857+5031	134.4673	50.5234	551	51993	538	1.39	20.40	20.06	19.47	19.16	18.92	14.84	13.37
J1040+6122	160.2032	61.3792	561	52295	329	1.16	19.77	19.05	18.48	18.29	18.12	14.12	12.86
J0849+0217	132.4738	2.2860	564	52224	010	1.11	19.55	19.17	18.83	18.77	18.69	14.86	13.69
J1045+0540	161.3088	5.6755	578	52339	574	0.99	20.60	19.95	19.38	19.24	18.96	15.16	14.11
J1432+0352	218.2217	3.8823	585	52027	159	1.69	20.72	19.98	19.61	19.09	18.80	15.03	13.59
J1355+6152	208.7761	61.8694	605	52353	319	1.36	18.93	18.72	18.31	18.14	18.12	14.69	13.44
J1507+5804	226.9116	58.0703	610	52056	064	1.45	19.61	19.04	18.30	18.19	18.11	14.97	13.90