

COSMOS场中高红移大质量星系的形态分类研究*

方官文^{1†} 马仲阳^{2,3} 孔 旭^{2,3}

(1 大理大学天文与科技史研究所 大理 671003)

(2 中国科学院星系与宇宙学重点实验室 合肥 230026)

(3 中国科学技术大学天文学系 合肥 230026)

摘要 基于 COSMOS (Cosmic Evolution Survey) 天区的多波段测光数据和 HST (Hubble Space Telescope) 近红外高分辨率观测图像, 利用质量限 (恒星质量 $M_* \geq 10^{10.5} M_\odot$) 选取了 362 个红移分布在 $1 \leq z \leq 3$ 的星系样本, 并对这些大质量星系的形态特征进行了分类研究. 来自 UVJ ($U - V$ 和 $V - J$) 双色图分类系统、目视分类系统、非模型化分类系统 (基尼系数 G 和矩指数 M_{20}) 和模型化分类系统 (Sérsic index, n) 的分类结果彼此相一致. 相比较于恒星形成星系 (SFGs), 通过 UVJ 双色图定义的宁静星系 (QGs) 表现出致密的椭圆结构, 而且 G 和 n 值偏大, 但 M_{20} 和星系有效半径 (r_e) 偏小. 不同星系分类系统 (双色图分类系统、非模型化分类系统和模型化分类系统) 定义的 SFGs 和 QGs 样本, 都明显存在星系的大小随红移的演化关系, 这种演化趋势 QGs 比 SFGs 更剧烈, 而且不依赖于星系分类方法的选择.

关键词 星系: 演化, 星系: 基本参数, 星系: 结构, 星系: 高红移

中图分类号: P157; 文献标识码: A

1 引言

高红移大质量 (恒星质量 $M_* \geq 10^{10} M_\odot$) 星系的观测和研究是当代天文学的一个热点, 它对于我们了解星系的形成和演化, 约束不同的星系形成模型等都至关重要. 通过研究星系的结构随红移的演化, 我们可以了解宇宙早期的原初物质是怎样通过引力作用逐渐塌缩形成原初星系, 以及高红移星系是通过怎样的过程演变为现在能够观测到的各类星系, 从而了解和约束星系的形成和演化过程. 表征星系结构的最直接的观测特征为星系的形态, 即星系中发光物质 (组成星系的恒星和尘埃) 在观测者视线方向的投影. 因此, 研究不同红移处星系的形态特征, 并与模型结果相比较, 可以了解星系、乃至宇宙的形成和演化^[1-2]. 星系形态是反映星系物理性质的一个重要特征量, 它与星系的其他

2015-03-27收到原稿, 2015-04-21收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303002, 11225315, 11320101002)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB09000000)和云南省应用基础研究计划项目(2014FB155)资助

[†]wen@mail.ustc.edu.cn

物理性质有一定的关系,如早型星系年老、颜色红、消光弱、多处于高密度区、恒星形成率低,而晚型星系有着相反的特性^[3].为了研究不同类型星系的物理特征,我们首先要做的是有效区分星系的不同形态,这样一个合理的分类方法就显得非常重要.

不同的星系分类方法依据的分类标准不尽相同,这里主要介绍一下目视分类系统、模型化分类系统、非模型化分类系统和双色图分类系统. (1) 利用目视的分类方法,很多学者提出了不同的星系分类方案,其中最著名的为哈勃在 1926 年提出的“音叉图”星系形态分类系统^[4].该分类系统将星系形态分类成:椭圆星系、透镜星系、旋涡星系和不规则星系. (2) 模型化分类系统是利用星系的面亮度轮廓对星系形态进行分类,不同形态星系的面亮度(即星系每单位面积发射的视光强度)分布是不同的^[5].椭圆星系的面亮度轮廓可以较好地利用 $r^{1/4}$ (r 是星系面亮度分布半径) 律进行拟合,而盘主导的星系面亮度满足指数律分布. (3) 非模型化分类系统是基于表征星系形态的结构参数来对星系形态进行分类,这些参数包括基尼系数 (G)、矩指数 (M_{20})、聚集度指数 (C) 以及非对称指数 (A) 等^[6].早型椭圆状星系有较大的 G 和 C ,但 M_{20} 和 A 较小,而对于晚型旋涡星系(或不规则星系)则有着相反的性质. (4) 双色图分类系统是利用不同类型星系能谱分布的差异,将星系分类成恒星形成星系(SFGs)和宁静星系(QGs).例如在静止坐标系中的 UVJ ($U - V$ 和 $V - J$) 双色图上, Muzzin 等^[7]定义 QGs (对于红移分布在 $1 < z < 3$ 的源) 的颜色判据是: $U - V > 1.3$, $V - J < 1.5$ 且 $U - V > 0.88(V - J) + 0.59$, 而 SFGs 则分布在双色图中相反的区域.

以上我们介绍了星系的目视分类系统、模型化分类系统、非模型化分类系统和双色图分类系统,更多关于星系分类方法的描述和分析可参考文献 Sandage^[8]和汪敏等^[9].相对于目视分类方法只适合小样本和具有很强的主观性,模型化分类方法需要设定星系光度分布函数形式.在星系的具体面亮度分布未知的情况下,通常利用 Sérsic 提出的面亮度轮廓函数 ($r^{1/n}$, n 称为 Sérsic 指数) 来对星系面亮度分布进行拟合.对于在光学波段近邻早型星系的面亮度分布一般满足 $n > 2$, 而晚型星系对应 $n < 2$ ^[10–11].非模型化分类方法的优势是基于计算机自动测量,不需要考虑星系光度分布形式,所以对大样本星系形态的研究很适用,而且这些形态结构参数有着丰富的物理意义^[2].例如: M_{20} 和 A 与星系相互作用相关, G 和 C 反映星系辐射流量分布性质.至于双色图分类系统定义的 SFGs 和 QGs, 污染源主要来自颜色分界线附近的星系.

来自星系分类系统定义的恒星形成星系(SFGs)和宁静星系(QGs),它们的形态结构差异反映出星系不同的形成和演化过程^[2].基于高分辨率的光学和近红外波段观测图像,最近很多研究工作发现在相同恒星质量条件下,在红移 $1 < z < 3$ 区间内星系的有效半径(r_e , 它表明星系总光度的一半是由 r_e 内部发射的)比近邻同类型星系小^[12–23].宁静星系相差 3 到 6 倍(恒星形成星系相差 1.5 到 3 倍).Naab 等^[24]和 Hopkins 等^[25]认为大质量宁静星系随红移的这种演化趋势可能是由于星系间的微并合导致的.但也有作者认为拥有较大尺寸的恒星形成星系随着时间演化,其恒星形成受到抑制(如 AGN 反馈、星风作用、星系间的潮汐作用等)演化成宁静星系,从而在观测上产生 QGs 的大小随红移减小而增大的现象^[26–27].从星系的纯光度演化模型^[28]来看,这样的观测事实是无法解释的.因为该模型认为在红移 $z > 3$ 时,大质量星系的大部分恒星已经形成,并在随后的演化过程中是被动演化,没有并合事件发生,星系的大小随红移没有明显的演化关系.

本文我们基于 COSMOS (Cosmic Evolution Survey)/UltraVISTA (Ultra-deep Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) 场中多波段测光数据和 HST WFC3 (Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3) 近红外高分辨率的观测图像, 利用目视分类系统、模型化分类系统、非模型化分类系统和双色图分类系统对不同类型的高红移大质量星系进行分类研究, 并比较不同分类方法之间的差异. 另外, 我们也会讨论不同星系分类系统定义的 SFGs 和 QGs 样本, 是否会导致不同类型星系的大小随红移的演化关系发生明显的变化.

2 数据和样本选择

COSMOS/UltraVISTA 巡天场中既有窄带光谱巡天数据^[29], 又有多波段宽带观测图像 (波长范围从 X 射线到射电波段)^[30], 特别是来自 CANDELS^[31–32] (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) 巡天的 HST WFC3 近红外 (F125W 和 F160W) 高分辨率 ($0.06'' \text{ pixel}^{-1}$) 的观测图像. 我们的研究工作是基于 Muzzin 等^[33]提供的星表, 该星表不仅包括多波段测光数据, 而且提供了星系各种物理参数测量. 例如, 测光红移, 恒星质量, 静止坐标系中的颜色 ($U - V$ 和 $V - J$) 等. 关于 COSMOS 巡天以及多波段观测数据的描述也可参考 Fang 等^[34–35]文献.

为了使质量限选取样本的完备性高于 95%, 我们利用 $M_* \geq 10^{10.5} M_\odot$ 的选择判据从 CANDELS-COSMOS 场 (天区有效面积 $\sim 210 \text{ arcmin}^2$) 中选取了 362 个红移分布在 $1 \leq z \leq 3$ 星系样本, 这些源都有 HST WFC3 近红外 (F125W 和 F160W) 观测数据. 考虑到星系形态结构性质对观测波长的依赖, 对于红移处在 $1 \leq z < 1.76$ 范围内的星系, 我们利用 F125W 波段观测图像研究它们的形态结构特征. 而对于红移分布在 $1.76 < z \leq 3$ 区间内的源, 形态分析的数据来自 F160W 波段. 即样本中星系的形态性质研究对应应在静止坐标系的光学波段 ($\lambda_{\text{rest}} \sim 5300 \text{ \AA}$). 在本工作中, 我们测量的星系形态结构参数包括基尼系数 (G , 用于定量描述一个星系中各像元的流量相对分布情况)、矩指数 (M_{20} , 贡献星系 20% 总流量的所有最亮像元的归一化 2 阶矩)、Sérsic 指数 (n) 和有效半径 (r_e). 关于这些参数测量的详细信息在 Fang 等^[36–38]和 van der Wel 等^[39]工作中都有描述和讨论.

3 星系的形态分类

基于 Muzzin 等^[7]定义的 UVJ ($U - V$ 和 $V - J$) 双色图分类判据, 我们将样本中的星系分类成恒星形成星系 (SFGs) 和宁静星系 (QGs). 如图 1 所示, 其中 152 个 QGs 分布在 UVJ 双色图上的左上角, 210 个 SFGs 则分布在双色图中相反的区域, 它们占整个样本的 58%. 图中的实线对应的颜色判据为: $U - V = 1.3$, $V - J = 1.5$ 和 $U - V = 0.88(V - J) + 0.59$. 为了在 UVJ 双色图上研究星系的 Sérsic 指数分布情况, 我们将样本中的星系依据红移大小分成 4 个红移区间, 每个红移区间大小是 0.5, 如图 2 所示. 从该图中我们发现被 UVJ 划分为 QGs 的源 Sérsic 指数偏大, 主要分布在 $n > 2$ 区域, 而 SFGs 的 Sérsic 指数明显偏小, 大部分星系的 n 值小于 2. 对于 $1.5 < n < 2.5$ 的

星系主要分布在颜色分界线附近. 这些结果表明星系的双色图分类与 Sérsic 指数分布是相一致的. 与此同时, 我们也发现越到高红移, 样本中恒星形成星系的比例越高 (53%, 50%, 73%, 85%).

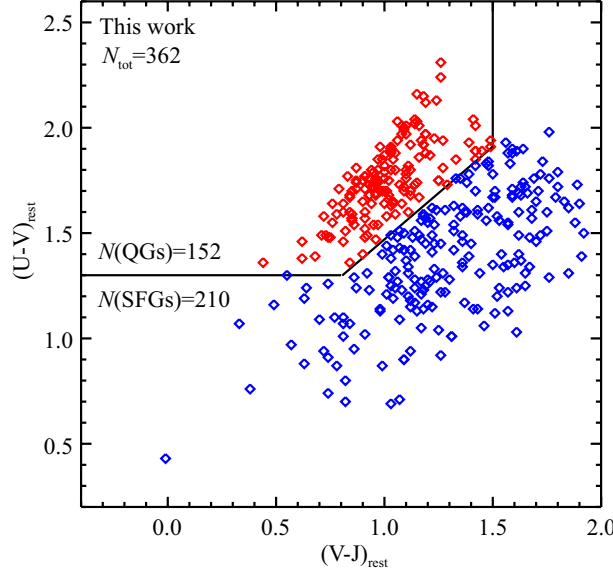


图 1 星系在 UVJ 双色图上的分布 ($1 \leq z \leq 3$). 图中的实线是来自 Muzzin 等^[7]提供的颜色判据 ($U - V = 1.3$, $V - J = 1.5$ 和 $U - V = 0.88(V - J) + 0.59$).

Fig. 1 The distribution of galaxies in the $(U - V)_{\text{rest}}$ vs. $(V - J)_{\text{rest}}$ diagram ($1 \leq z \leq 3$). The solid lines correspond to the color criteria from Muzzin et al.^[7] ($U - V = 1.3$, $V - J = 1.5$, and $U - V = 0.88(V - J) + 0.59$).

利用哈勃空间望远镜 WFC3 近红外 (F125W 和 F160W) 高分辨率观测图像, 我们对样本中的星系进行了目视形态分类. 分类的依据类似于哈勃“音叉图”星系形态分类系统, 其形态类型包括椭圆星系、盘星系和不规则星系. (1) 椭圆星系: 从图像观察星系表现出椭球或球状特征, 而且没有延展子结构, 星系辐射的光度聚集在星系中心区域. (2) 盘星系: 该类型星系从外表上看有单一的亮核并有延展的盘状结构. (3) 不规则星系: 结构上缺少对称性或没有明显旋臂特征, 而且有一些团块状子结构, 有些源明显带有相互作用特征 (如潮汐臂、气体桥、双不对称体等). 图 3 提供了上述星系形态目视分类的典型例子, 每个源对应的 G 和 M_{20} 也被标注在每个小图像上. 在图 4 中, 我们进一步比较了星系目视分类和双色图分类的结果. 在星系被 UVJ 判据划分为 SFGs 的样本中, 椭圆星系、盘星系和不规则星系所占比例依次为: 27%, 31%, 42%, 而在 QGs 样本中, 相应的比例是: 80%, 14%, 6%. 这表明恒星形成星系的形态主要是盘状或不规则结构 (73%), 但对于宁静星系来说, 主导的结构特征是椭圆状 (80%). 另外, 从图 4 中我们也可以看到, 盘星系主要分布在颜色分界线附近, 但在更高红移区间内 ($1.76 < z \leq 3$), 这种现象并不明显.

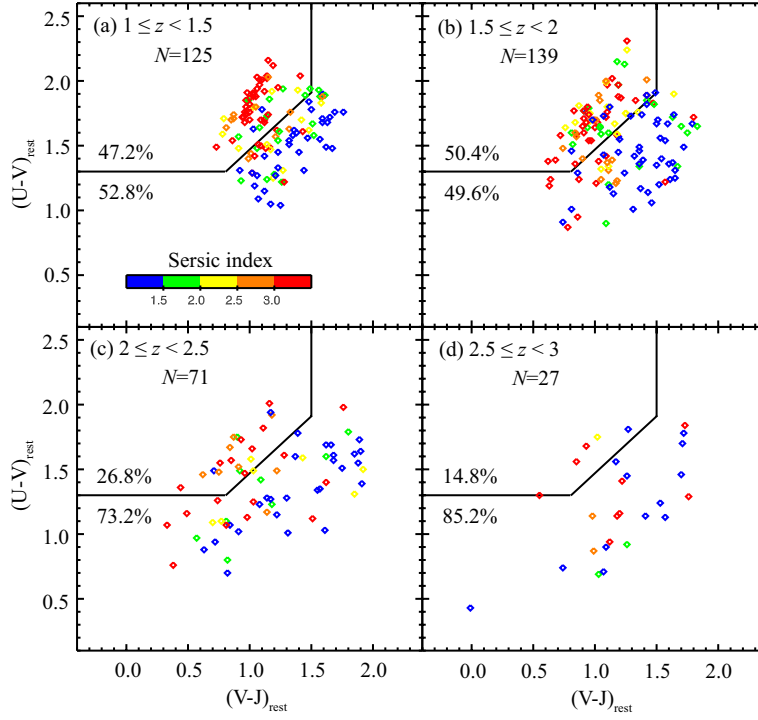


图 2 不同红移区间内星系 Sérsic 指数在 UVJ 双色图上的分布. 不同大小的 Sérsic 指数用不同颜色表示. 每个红移区间内星系的数目, 以及 QGs 和 SFGs 所占的比例也标记在该图中.

Fig. 2 The distribution of Sérsic indexes of galaxies for different redshift bins in the $(U-V)_{\text{rest}}$ vs. $(V-J)_{\text{rest}}$ diagram. Different values of Sérsic indexes are plotted in different colors. The number of galaxies, and the fraction of QGs and SFGs in each redshift bin are respectively shown in this figure.

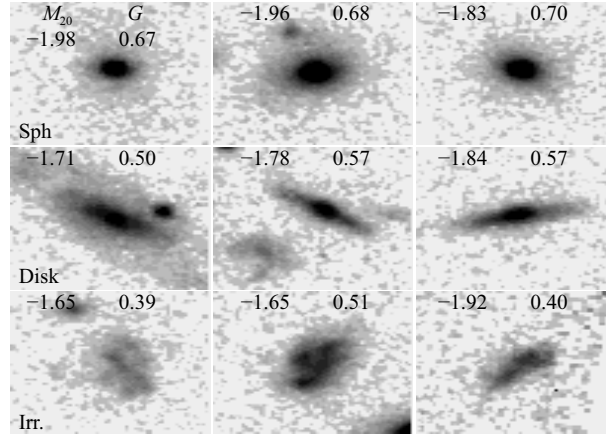


图 3 星系形态目视分类的典型例子. 上图: 椭圆星系, 中图: 盘星系, 下图: 不规则星系. 每个源对应的 G 和 M_{20} 也被标注在每个小图像上. 每个小图像的尺寸是 $4'' \times 4''$.

Fig. 3 Examples of three general morphological types from visual inspection. Top: spheroid, middle: disk, bottom: irregular. Values of G and M_{20} are shown in each stamp image. The size of each image is $4'' \times 4''$.

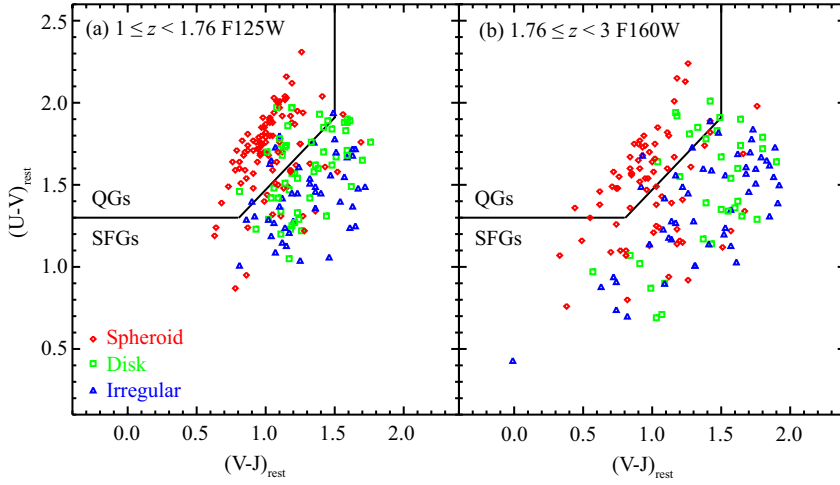


图 4 星系目视分类结果在 UVJ 双色图上的分布. 红色菱形、绿色方块和蓝色三角形分别表示椭圆星系、盘星系和不规则星系.

Fig. 4 The distribution of visual morphological types of galaxies for different redshift bins in the $(U - V)_{\text{rest}}$ vs. $(V - J)_{\text{rest}}$ diagram. The red diamond, green square, and blue triangle represent spheroid, disk, and irregular galaxies by visual inspection, respectively.

为了定量描述样本中星系的形态性质, 我们利用 HST WFC3 近红外观测数据测量了样本中星系的形态参数 (G 和 M_{20}). 图 5 显示了所有源的形态参数分布, 其中红色和蓝色的点代表 UVJ 分类结果, 而形状不同的数据点是由目视分类给出. 图中黑色实线表示的是非模型化分类系统定义的形态划分标准, 星系的形态参数 (G 和 M_{20}) 值满足 $G > 0.125M_{20} + 0.8$ 判据则被归类到早型星系, 反之则属于晚型星系. 从该图中我们发现, 目视分类中的椭圆星系、盘星系和不规则星系, 对应的 G 值逐渐减小, 而 M_{20} 则增大, 盘星系的形态参数分布位于椭圆星系和不规则星系之间. 这说明椭圆星系光的聚集度最大, 不对称性最小, 而不规则星系却恰恰相反. 另外, 相比较于双色图定义的 SFGs, 样本中 QGs 的 G 偏大而 M_{20} 偏小. 以上结论表明: 来自双色图分类系统、目视分类系统和非模型化分类系统的星系分类结果彼此相一致.

4 星系的结构演化

当前关于星系形成和演化主要有等级成团模型^[40]和纯光度演化模型^[28]两种模型. 等级成团模型认为星系起源于暗物质晕的塌缩和并合, 重子物质在暗物质晕中冷却并塌缩形成星系盘. 盘星系通过并合破坏盘状结构形成椭圆星系. 在这种模型中先有小质量的星系形成, 而后通过不断地并合形成近邻的大质量星系. 检验这两种模型一个最直接的有效方法是研究星系的大小 r_e 随红移演化关系. 基于来自 CANDELS-COSMOS 场中所选的大质量星系样本, 我们利用 UVJ 定义的颜色判据将星系分类成 SFGs 和 QGs. 在每一类型样本当中, 又根据红移大小将其划分成不同的区间. 如图 6 所示, 这里给出了两个红移区间内星系有效半径与恒星质量的关系, 黑色实线是来自 Shen 等^[11]对近邻

星系的研究结果, 其中 LTGs 和 ETGs 分别表示晚型星系和早型星系. 从该图我们可以得到这样一些信息: (1) 高红移星系有着类似于近邻星系的 $r_e \propto M_*^\alpha$ 关系, 指数 α 的差异取决于星系的形态类型; (2) 相比较于同类型的近邻星系, 高红移星系有效半径整体偏小, 而且质量比较大的星系 r_e 偏大, 这点对于 QGs 星系更加明显; (3) 在高红移处不论 SFGs 还是 QGs, 都存在极其致密的源 ($r_e < 1$ kpc), 这些星系的形成很可能来自更高红移处富气体星系间的合并.

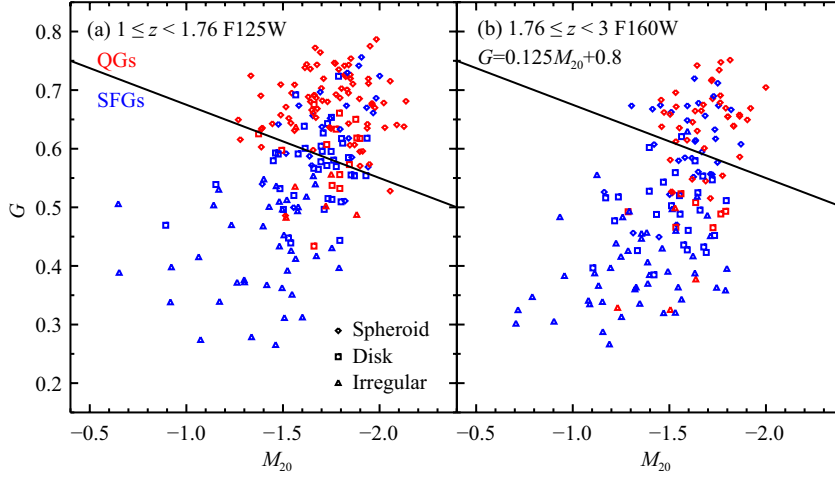


图 5 样本中的星系在 $G - M_{20}$ 图上的分布. 红色 (QGs) 和蓝色 (SFGs) 的点代表 UVJ 分类结果. 形状不同的数据点是由目视分类给出, 菱形、方块和三角形分别代表椭圆星系、盘星系和不规则星系. 图中黑色实线表示的是非模型化分类系统定义的形态划分标准: $G = 0.125M_{20} + 0.8$.

Fig. 5 Distribution of galaxies in the M_{20} vs. G plane. The SFGs are plotted in blue color, while QGs are in red. Spheroid, disk, and irregular galaxies which are classified by visual inspection, are plotted in diamond, square, and triangle symbols, respectively. The solid lines represent the defined criterion of nonparametric morphology ($G = 0.125M_{20} + 0.8$).

图 7 进一步显示了星系有效半径随红移的演化关系, 红色点和蓝色点分别代表 UVJ 定义的 QGs 和 SFGs, 其中带有误差棒的方形点表示不同红移区间内 (红移区间大小是 0.5) r_e 的中值, 红色线 (QGs) 和蓝色线 (SFGs) 是对这些中值的最佳拟合. 对于 QGs, 由于在红移 $2.5 \leq z < 3$ 范围内源的数目太少, 因此拟合时并没有采用这个红移区间内的数据. 与此同时, 我们在图 7 中也给出了其他分类系统对应的不同类型星系大小随红移的演化关系, 正如上一节所描述的那样, 模型化分类系统采用的是 $n = 2$ 判据, 而非模型化分类系统则利用 $G = 0.125M_{20} + 0.8$ 标准, 为了不影响图的显示效果, 这里我们就没有画出这两种分类方法产生的数据点, 只给出最佳拟合曲线. 从图 7 我们可以得出这些结论: (1) 高红移大质量星系 (QGs 和 SFGs) 的大小随红移有明显的演化关系, 这种演化趋势 QGs 比 SFGs 更剧烈, 这表明 QGs 大小的增长可能是由于星系间的微合并导致的, 这种并在 QGs 演化过程中可能发生多次; (2) 不同星系分类方法得到的 QGs 和 SFGs 样本都存在 (1) 的结论, 这说明星系大小随红移演化的关系不依赖于星系分类方法的选择; (3) 我们证实了以前的研究结果, 在相同恒星质量条件下, 高红移星系 ($1 < z < 3$) 大

小比近邻同类型星系小, QGs 相差 3 到 6 倍 (SFGs 相差 1.5 到 3 倍).

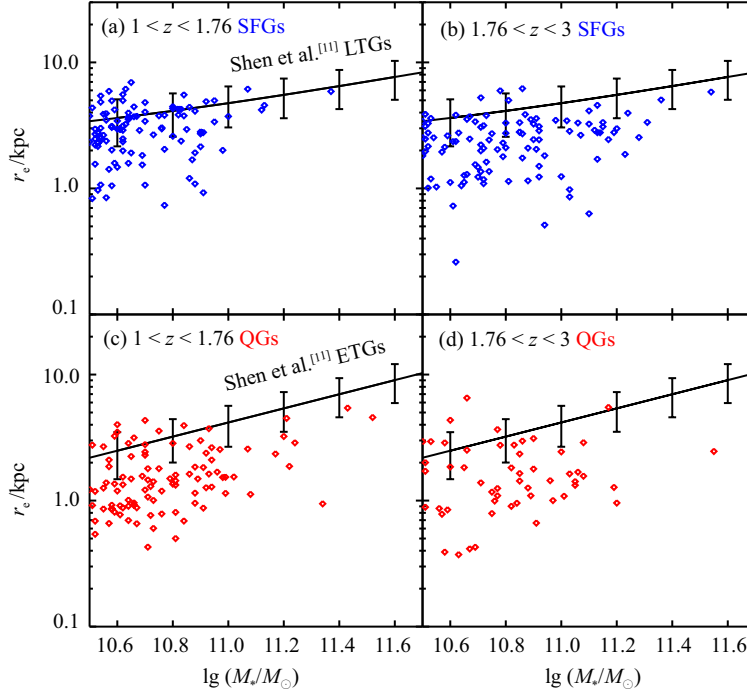


图 6 不同红移区间内星系有效半径与恒星质量的关系. 黑色实线是来自 Shen 等^[11]对近邻星系的研究结果, 其中 LTGs 和 ETGs 分别表示晚型星系和早型星系.

Fig. 6 The effective radius vs. stellar mass diagram for our sample. SFGs are plotted in (a) and (b) panels, while QGs are plotted in (c) and (d) panels. The solid lines represent the fitting curves for late type galaxies (LTGs) and early type galaxies (ETGs) at $z \sim 0$ from Shen et al.^[11].

5 总结

基于 CANDELS-COSMOS 场中多波段测光数据, 利用质量限 ($M_* \geq 10^{10.5} M_\odot$), 我们构建了一个高红移 ($1 \leq z \leq 3$) 大质量星系样本, 样本包括 362 个星系. 这些源都有 HST WFC3 近红外 (F125W 和 F160W) 高分辨率的观测数据, 我们的形态结构分析是依据星系红移大小的差异而选择不同的观测图像进行研究, 对于红移处在 $1 \leq z < 1.76$ 范围内的星系, 我们利用 F125W 波段观测数据研究它们的形态结构特征. 而对于红移分布在 $1.76 < z \leq 3$ 区间内的源, 形态分析的数据是来自 F160W 波段. 即样本中星系的形态性质研究是对应在静止坐标系的光学波段 ($\lambda_{\text{rest}} \sim 5300 \text{ \AA}$).

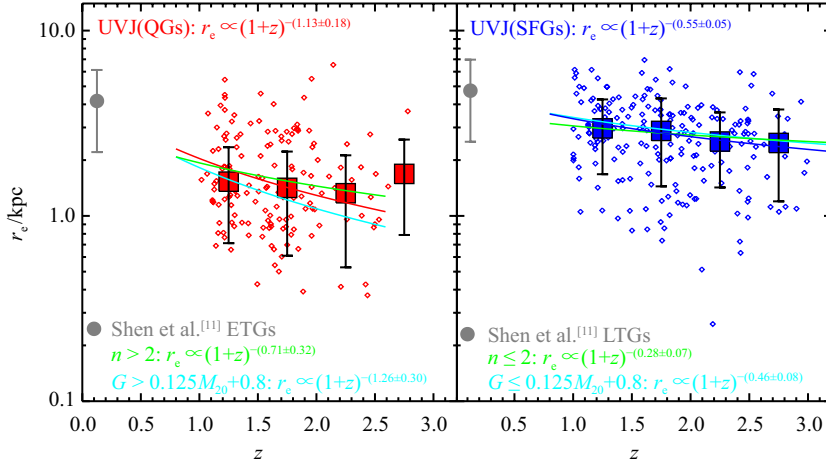


图 7 大质量 ($M_* > 10^{10.5} M_\odot$) 星系的有效半径 (r_e) 随红移的演化关系. 带有误差棒的方形点表示不同红移区间内 r_e 的中值, 红色线 (QGs) 和蓝色线 (SFGs) 是对这些中值的最佳拟合. 绿线和青色线分别表示模型化分类系统和非模型化分类系统对应的不同类型星系大小随红移的演化关系.

Fig. 7 Evolution of the effective radius (r_e) with redshift for the massive galaxies with estimated stellar masses $M_* > 10^{10.5} M_\odot$. The median values of effective radius of QGs and SFGs in each redshift bin are represented by red and blue squares, respectively. The red and blue lines are the best-fit curves respectively for QGs and SFGs in our sample. The green and cyan lines represent the size evolution with redshift for different divisions of QG and SFG samples, respectively.

在本工作中, 我们采用了目视分类系统、模型化分类系统、非模型化分类系统和双色图分类系统对不同类型的高红移大质量星系进行了分类研究, 并比较了不同分类方法之间的差异, 结果表明不同星系分类方法给出的结果彼此相一致. 相比较于恒星形成星系 (SFGs), 通过 UVJ 双色图定义的宁静星系 (QGs) 表现出致密的椭圆结构, 而且 G 和 n 值偏大, 但 M_{20} 和星系有效半径 (r_e) 偏小. 与此同时, 我们也发现不同星系分类方法得到的 QGs 和 SFGs 样本, 对于同一类型星系都有相似的星系大小随红移的演化关系, 而且这种演化趋势 QGs 比 SFGs 更剧烈, 这说明星系大小随红移演化的关系不依赖于星系分类方法的选择.

参考文献

- [1] Ravindranath S, Giavalisco M, Ferguson H C, et al. ApJ, 2006, 652: 963
- [2] Conselice C J. ARA&A, 2014, 52: 291
- [3] Ball N M, Loveday J, Brunner R J. MNRAS, 2008, 383: 907
- [4] Hubble E. ApJ, 1926, 64: 321
- [5] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. AJ, 2002, 124: 266
- [6] Lotz J M, Primack J, Madau P. AJ, 2004, 128: 163
- [7] Muzzin A, Marchesini D, Stefanon M, et al. ApJ, 2013, 777: 18
- [8] Sandage A. ARA&A, 2005, 43: 581
- [9] 汪敏, 孔旭. 天文学进展, 2007, 25: 215
- [10] Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A, et al. ApJ, 2003, 592: 819
- [11] Shen S, Mo H J, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 343: 978

- [12] van der Wel A, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJ, 2014, 788: 28
- [13] Trujillo I, Conselice C J, Bundy K, et al. MNRAS, 2007, 382: 109
- [14] Cimatti A, Cassata P, Pozzetti L, et al. A&A, 2008, 482: 21
- [15] van Dokkum P G, Kriek M, Franx M. ApJL, 2008, 677: L5
- [16] Akiyama M, Minowa Y, Kobayashi N, et al. ApJS, 2008, 175: 1
- [17] Franx M, van Dokkum P G, Förster Schreiber N M, et al. ApJL, 2008, 689: L101
- [18] Szomoru D, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJL, 2010, 714: L244
- [19] Szomoru D, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJ, 2012, 749: 121
- [20] van der Wel A, Rix H W, Wuyts S, et al. ApJ, 2011, 730: 38
- [21] Barro G, Faber S M, Pérez-González P G, et al. ApJ, 2013, 765: 104
- [22] Patel S G, van Dokkum P G, Franx M, et al. ApJ, 2013, 766: 15
- [23] Morishita T, Ichikawa T, Kajisawa M. ApJ, 2014, 785: 18
- [24] Naab T, Johansson P H, Ostriker J P. ApJL, 2009, 699: L178
- [25] Hopkins P F, Bundy K, Hernquist L, et al. MNRAS, 2010, 401: 1099
- [26] Carollo C M, Bschorr T J, Renzini A, et al. ApJ, 2013, 773: 112
- [27] Poggianti B M, Moretti A, Calvi R, et al. ApJ, 2013, 777: 125
- [28] Larson R. MNRAS, 1975, 173: 671
- [29] Lilly S J, Le Fèvre O, Renzini A, et al. ApJS, 2007, 172: 70
- [30] Scoville N, Aussel H, Brusa M, et al. ApJS, 2007, 172: 1
- [31] Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. ApJS, 2011, 197: 35
- [32] Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. ApJS, 2011, 197: 36
- [33] Muzzin A, Marchesini D, Stefanon M, et al. ApJS, 2013, 206: 8
- [34] 方官文, 马仲阳, 陈洋, 等. 天文学报, 2015, 56: 7
- [35] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. ChA&A, 2015, 39: 307
- [36] 方官文, 马仲阳, 陈洋, 等. 天文学报, 2014, 55: 458
- [37] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. ChA&A, 2015, 39: 156
- [38] 方官文. 天文学报, 2014, 55: 444
- [39] van der Wel A, Bell E F, Häussler B, et al. ApJS, 2012, 203: 24
- [40] White S D M, Frenk C S. ApJ, 1991, 379: 52

Morphological Classification of High-redshift Massive Galaxies in the COSMOS/UltraVISTA Field

FANG Guan-wen¹ MA Zhong-yang^{2,3} KONG Xu^{2,3}

(1 Institute for Astronomy and History of Science and Technology, Dali University, Dali 671003)

(2 Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

(3 Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT Utilizing the multi-band photometry catalog of the COSMOS (Cosmic Evolution Survey)/UltraVISTA (Ultra-deep Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) field and the high-resolution HST WFC3 (Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3) near-infrared imaging from the CANDELS (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) field, we present a quantitative study of the morphological classification of galaxy for a large mass-selected sample. Our sample includes 362 galaxies within photometric redshift $1 \leq z \leq 3$ and stellar mass $M_* \geq 10^{10.5} M_\odot$. The results from the rest-frame (U – V) vs. (V – J) (UVJ) colors classification, visual

inspection, nonparametric morphology analysis, and structural parameters study are in good agreement with each other. Quiescent galaxies (QGs) classified by UVJ colors generally have larger Sérsic index (n) and Gini coefficient (G), smaller size (r_e) and moment (M_{20}), and they are visually compact. While star-forming galaxies (SFGs) are reversed. In the meantime, we explore the size evolution with redshift for various divisions of QG and SFG samples, and confirm that both of size will enlarge with time, but QGs are rapider than SFGs. Moreover, we find that the choice of division between QGs and SFGs (i.e. colour, shape, morphology) is not particularly critical.

Key words galaxies: evolution, galaxies: fundamental parameters, galaxies: structure, galaxies: high-redshift