

COSMOS场中星系恒星形成的演化研究*

方官文^{1,2†} 马仲阳^{2,3} 陈 洋^{2,3} 孔 旭^{2,3‡}

(1 大理学院天文与科技史研究所 大理 671003)

(2 中国科学院星系宇宙学重点实验室 合肥 230026)

(3 中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

摘要 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, 利用质量限选取了红移分布在 $0 < z < 3.5$ 的星系样本. 通过 UVJ ($U - V$ 和 $V - J$) 双色图分类判据将星系分类成恒星形成星系 (SFGs) 和宁静星系 (QGs). 对于红移分布在 $0 < z < 1.5$ 范围内且 $M_* > 10^{11} M_\odot$ 的 QGs 来说, 该星系在样本中所占比例高于70%. 在红移 $0 < z < 3.5$ 范围内, 恒星形成星系的恒星形成率 (SFR) 与恒星质量 (M_*) 之间有着很强的主序 (MS) 关系. 对于某一固定的恒星质量 M_* 来说, 星系的 SFR 和比恒星形成率 (sSFR) 会随着红移增大而增大, 这表明在高红移处恒星形成星系更加活跃, 有激烈的恒星形成. 相对于低质量的星系来说, 高质量的 SFGs 有较低的 sSFR, 这意味着低质量星系的增长更多的是通过星系本身的恒星形成. 通过结合来自文献中数据点信息, 发现更高红移 ($2 < z < 8$) 星系的 sSFR 随红移的演化趋势变弱, 其演化关系是 $\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$.

关键词 星系: 恒星形成, 星系: 基本参数, 星系: 演化, 方法: 数据分析

中图分类号: P157; 文献标识码: A

1 引言

星系的形成和演化是观测天文学的研究热点. 研究星系的形成和演化, 就必须观测和研究不同红移处星系的各種物理特征 (例如: 星系的光度、光谱、形态、恒星形成率、恒星质量、尘埃消光等), 并与星系形成和演化的模型预言相比较, 从而了解星系的形成和演化, 同时为各种理论模型提供观测上的约束. 探索星系质量聚集的历史需要测量3个基本参数: 恒星质量 (M_*)、恒星形成率 (SFR) 和比恒星形成率 (sSFR). (1) 恒星

2014-08-01收到原稿, 2014-09-09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

[‡]xkong@ustc.edu.cn

质量 (M_*): 星系中那些年龄、化学成分、空间分布和运动性质等方面十分相近的大量天体质量. 利用星族合成方法^[1]将星系的积分特性与所研究星系的光度和光谱进行比较, 进而定量确定星系的恒星质量以及其它物理量. (2) 恒星形成率 (SFR): 星系单位时间内将气体转化成恒星的速率称为恒星形成率. 计算星系的恒星形成率有很多方法, 主要是基于星系多波段测光和光谱信息. 对于早型星系来说, 当前的 SFR 非常低, 而晚型星系则相反, 特别是那些星暴星系、极亮红外星系、湿并合星系有着很高的恒星形成. (3) 比恒星形成率 (sSFR): 星系当前的恒星形成率 (SFR) 除以星系恒星质量 (M_*), 即 $sSFR = SFR/M_*$. 该量反映的是一个星系中能在给定的时间内转化为恒星的气体质量, 它常用来表征星系的恒星形成历史, 因此, 越高的比恒星形成率表明该星系中有更多恒星最近才形成.

基于 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 巡天数据, Brinchmann 等^[2]发现近邻恒星形成星系 (Star-Forming Galaxies, SFGs) 的恒星质量和恒星形成率有很强的相关性, 这样的关系被称为主序 (Main Sequence, MS). 类似的研究结果在 Peng 等^[3] 工作中也被证实. 随着高红移多波段星系巡天计划的开展和实施, 如今的天文研究者能准确测量远距离星系 ($z < 7$) 的恒星质量和恒星形成率^[4-17]. 利用这些观测数据, 很多研究工作已经发现在红移 $0.5 < z < 3$ 处也存在 MS 关系^[4-8]. 另外, 他们也发现星系的比恒星形成率随着红移增大而增大 ($z < 2$), 但在更高红移 ($z > 2$) 处, 星系的 sSFR 随红移演化趋势不明显^[10,17]. 对于相同红移区间内的星系来说, 低质量星系的 sSFR 高于大质量星系的 sSFR^[8-10]. 这些研究结果支持星系形成和演化的“downsizing”模型^[18], 即相对于大质量星系来说, 低质量星系的恒星形成更加活跃, 而且星系中这种恒星形成的剧烈程度随着红移减小而变弱.

恒星形成星系的主序 (MS, $SFR \propto M_*^\beta$) 关系, 对于不同的研究工作和不同的星系红移分布区间, 有着不同的斜率 β ($\approx 0.5 \sim 1.0$). 出现这种现象, 主要原因有以下几个方面: (1) 研究样本选择性差异. 例如, 星等限选样本、质量限选样本、多波段颜色选样本等; (2) 星系红移测量方式差异. 在没有光谱红移信息情况下, 不同的研究者采用不同的测光红移技术和参数设置; (3) 选取恒星形成星系 (SFGs) 的判据不同; (4) 计算星系的恒星形成率方法不一致; (5) 星系恒星质量测量技术的差异.

在本文中, 我们将基于 COSMOS (Cosmic Evolution Survey)/UltraVISTA (Ultra-deep Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) 场中多波段测光星表, 以及精确测量的星系红移、恒星质量和恒星形成率数据, 利用质量限选取完备性高于 90% 的星系样本. 相比较于前人的工作, 我们通过 UVJ ($U - V$ 和 $V - J$) 双色图将星系分类成恒星形成星系 (SFGs) 和宁静星系 (Quiescent Galaxies, QGs). 与此同时, 采用 $24 \mu\text{m}$ 流量限进一步剔除恒星形成星系样本中的宁静星系. 基于这样的星系样本, 研究不同红移区间内星系的恒星形成率、比恒星形成率与恒星质量的关系. 另外, 我们也分析不同恒星质量区间内恒星形成星系的比恒星形成率随红移的演化趋势. 通过结合来自文献中不同红移处 ($z \approx 0 \sim 8$) 恒星形成星系的 sSFR 观测数据, 研究星系的比恒星形成率与红移之间的演化关系.

2 观测和数据处理

COSMOS 巡天主要是用来探测星系的形成和演化随红移的变化, 以及与大尺度结构环境的关系^[19]. 该天区包括了多波段图像和光谱观测, 其天区有效覆盖面积约 2 deg^2 , 中心位置为 $\text{RA}(2000) = 10^{\text{h}}00^{\text{m}}28^{\text{s}}.6$, $\text{DEC}(2000) = +02^{\circ}12'21''.0$, 即它是处在天赤道附近, 而且有较低的银河前景消光, $E(B - V) \approx 0.02$. 所用的观测仪器有空间 HST (Hubble Space Telescope)、Spitzer、GALEX (Galaxy Evolution Explorer)、XMM (X-ray Multi-Mirror Mission) 和 Chandra, 以及地面 Subaru、VLA (Very Large Array)、VLT (Very Large Telescope)、CFHT (Canada France Hawaii Telescope)、VISTA 等望远镜. 涵盖的观测波长范围从 X 射线到射电波段. 相比较早期的一些巡天, 如 SDSS、2dF (Two-degree-Field)、6dF (Six-degree-Field)、2MASS (Two Micron All Sky Survey)、DEEP2 (Deep Extragalactic Evolutionary Probe 2) 等, COSMOS 提供了对较高红移处 ($1 < z < 3$) 星系研究的大量观测数据. 在 COSMOS/UltraVISTA 场中, 我们的研究工作是基于 Muzzin 等^[20]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 (如果星系没有对应的光谱红移), 恒星质量, 恒星形成率, 静止坐标系中的颜色 ($U - V$ 和 $V - J$), 等. 通过采用 Muzzin 等^[20]建议的颜色判据: $[J - K < 0.18(u - J) - 0.75, u - J < 3.0]$ 和 $[J - K < 0.08(u - J) - 0.45, u - J > 3.0]$, 我们从星表中剔除了恒星, 其中 u 波段数据来自 Subaru/SuprimeCam (Subaru Prime Focus Camera), 而 J 和 K 是由 VISTA/VIRCAM (VISTA InfraRed CAMera) 提供.

基于从远紫外到中红外多波段观测数据, Muzzin 等^[20]利用 EAZY^[21] (Easy and Accurate Zphot from Yale) 测光红移程序获取了星系测光红移信息. 同时, 来自 zCOSMOS^[22] (COSMOS 场中红移巡天) 的光谱红移和 NMBS^[23] (NEWFIRM Medium-Band Survey) 的测光红移被用来检验星系已测红移的精度. 通过已知星系的红移值并结合多波段测光数据, 采用 FAST^[24] (Fitting and Assessment of Synthetic Templates) 拟合软件, 进而计算出星系的恒星质量. 拟合过程中利用了 Calzetti 等^[25] 的尘埃消光律、Chabrier^[26] 初始质量函数 (IMF)、指数衰减的恒星形成模式, 以及太阳金属丰度. 至于星系恒星形成率的计算考虑了紫外 (UV) 和红外 (IR) 两个部分, 即 $\text{SFR}_{\text{tot}} = \text{SFR}_{\text{UV,uncorr}} + \text{SFR}_{\text{IR}}$. 其中 $\text{SFR}_{\text{UV,uncorr}} = 3.234 \times 10^{-10} L_{2800}$ ^[27] (L_{2800} 对应静止波段 $2800 \text{ \AA}$ 处光度), $\text{SFR}_{\text{IR}} = 0.98 \times 10^{-10} L_{\text{IR}}$ ^[27], L_{IR} 是星系的总红外光度. 关于 COSMOS/UltraVISTA 场中数据处理和分析的详细信息可参考文献 McCracken 等^[28] 和 Muzzin 等^[20].

3 星系样本选取和分类

为了使质量限选取样本的完备性高于 90%, 我们利用类似于 Patel 等^[29] 和 Ilbert 等^[30] 定义的质量选择判据, $\lg(M_*/M_{\odot}) = 9.5 + 0.8 \ln z$ (图 1 中黑色虚线), 选取星系样本. 如图 1 所示, 星系 K 波段总星等暗于 23.4 mag 的源 (黑色点) 完备性低于 90%. 我们的研究对象是红移分布在 $0 < z < 3.5$ 中的星系.

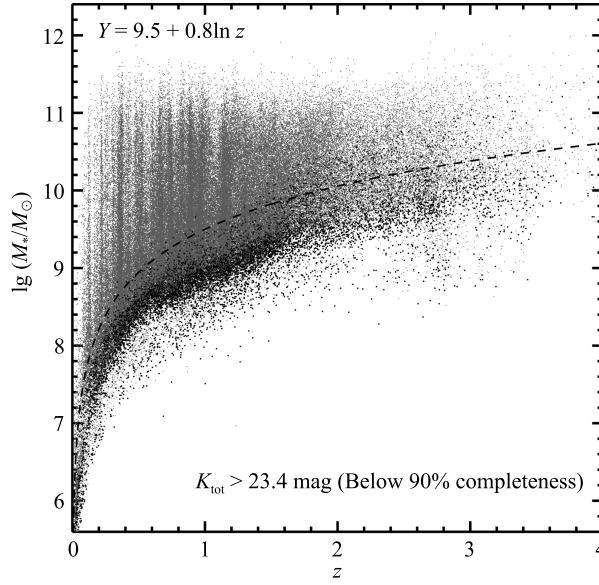


图 1 COSMOS/UltraVISTA 场中星系恒星质量随红移分布. 黑色点对应星系 $K_{\text{tot}} > 23.4$ mag (AB星等), 表示完备性低于 90%. 虚线 $Y = 9.5 + 0.8 \ln z$ ($Y = \lg(M_*/M_\odot)$) 对应的是质量限选择标准.

Fig. 1 The distribution of stellar masses (M_*) vs. redshifts (z) for the galaxies in the COSMOS/UltraVISTA field. The black dots represent galaxies with $K_{\text{tot}} > 23.4$ mag (AB), which means the completeness is below 90%. The dashed line ($Y = 9.5 + 0.8 \ln z$, $Y = \lg(M_*/M_\odot)$) corresponds to the mass limited criterion.

为了研究 SFGs 的恒星形成历史随红移的演化关系, 我们需要对星系的形态类型进行有效分类. 这里我们采用 Muzzin 等^[31]给出的在静止坐标系中颜色判据:

$$U - V > 1.3, \quad V - J < 1.5, \quad [0 < z < 4], \quad (1)$$

$$U - V > 0.88(V - J) + 0.69, \quad [0 < z < 1], \quad (2)$$

$$U - V > 0.88(V - J) + 0.59, \quad [1 < z < 4]. \quad (3)$$

利用 UVJ 双色分类方法, 星系被分类成恒星形成星系 (SFGs) 和宁静星系 (QGs). 图 2 显示了我们的星系样本在 UVJ 双色图上的分布. 依据星系红移的大小, 我们将星系样本分成 7 个红移区间, 每个红移区间大小是 0.5. 图 2 中的黑色实线对应的是颜色判据, 有关每个红移区间内星系总数目, 以及 SFGs 和 QGs 所占的比例都已经显示在该图中. 通过进一步分析我们发现, 当采用的星系恒星质量下限越大时, 不同红移区间内 QGs 所占的比例就越高. 对于 $M_* > 10^{11} M_\odot$ 来说, 依据红移区间从小到大顺序, QGs 所占的比例分别对应的是: 80%, 78%, 70%, 48%, 23%, 16%, 11%. 这说明在近邻宇宙 ($0 < z < 0.5$) 中, 那些大质量星系主要是早型的宁静星系 (约 80%), 而且在红移 $0 < z < 1.5$ 范围内, QGs 都占主导地位 (高于 70%). 随着红移的增大, QGs 所占的比例越来越小, 这表明高红移处星系中还存在大量气体, 而且恒星形成的抑制机制还没有充分体现出它们的作用, 此时的星系更多是 SFGs.

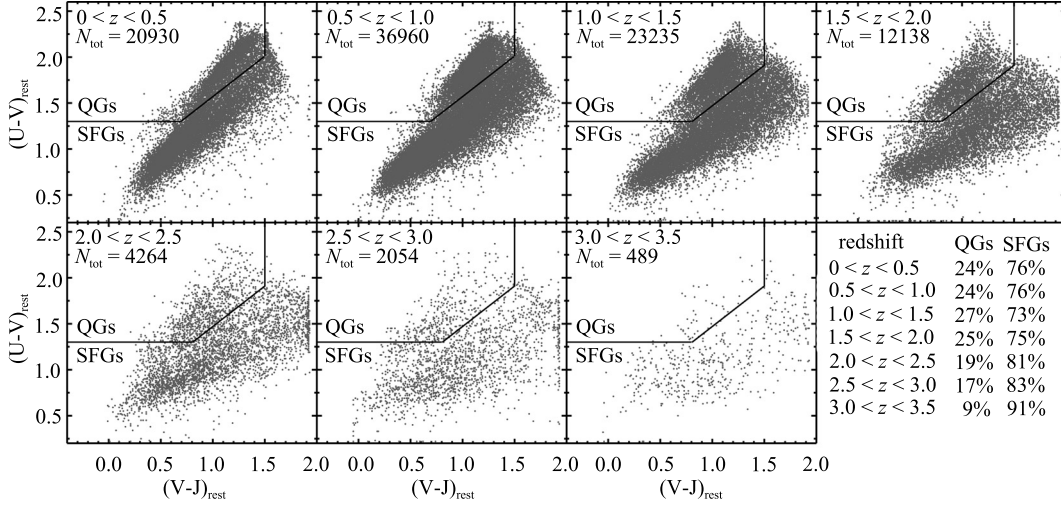


图 2 星系在 UVJ 双色图上的分布 ($0 < z < 3.5$, 7 个红移区间). 每个红移区间内星系的数目, 以及 QGs 和 SFGs 所占的比例也标记在该图中. 图中的实线是来自 Muzzin 等^[31]提供的颜色判据.

Fig. 2 The distribution of galaxies in the $(U-V)_{\text{rest}}$ vs. $(V-J)_{\text{rest}}$ diagram ($0 < z < 3.5$, with seven redshift bins). The number of galaxies, and the fractions of QGs and SFGs in each redshift bin are respectively shown in this figure. The solid lines correspond to the color criteria from Muzzin et al.^[31].

4 星系(比)恒星形成率与恒星质量关系

为了研究不同红移范围内恒星形成星系的(比)恒星形成率与恒星质量关系, 我们利用图 2 中相同的红移区间划分方法, 将样本分成 7 个红移区间. 图 3 和图 4 分别显示了样本中星系的恒星质量与恒星形成率、比恒星形成率之间的关系, 图中黑色点代表的是 Spitzer MIPS (Multiband Imaging Photometer for Spitzer) $24 \mu\text{m}$ 探测高于 2σ 的 SFGs, 不同红移区间内拟合的函数表达式也被标示在图中的右下角. 图 5 进一步比较了不同红移范围内星系的 SFR 和 sSFR 随红移变化的趋势. 作为参考比较, QGs 的拟合曲线也被显示在图 3、图 4 和图 5 中, 但这里我们并不对 QGs 的 SFR 和 sSFR 相关性进行讨论, 我们的研究对象是 SFGs. 与此同时, 图 3 和图 4 给出了来自 Elbaz 等^[5]、Daddi 等^[4]和 Rodighiero 等^[7]研究结果. 图 3(a) 显示我们计算的恒星质量与恒星形成率相关性高于 Elbaz 等^[5]标准, 这是由于他们的 SFGs 主要分布在 $z \approx 0$ 处. 而在图 3(b) 中, Elbaz 等^[5]标准高于我们拟合的结果, 原因是他们拟合出的关系是基于红移分布在 $0.8 < z < 1.2$ 范围内的恒星形成星系. 图 3(d) 中我们的恒星质量与恒星形成率相关性低于 Daddi 等^[4]和 Rodighiero 等^[7]标准. 这主要是来自两个方面影响: (1) 他们拟合的 SFGs 红移分布在 $1.5 < z < 2.5$ 范围内; (2) 他们依据 $\text{SFR}_{\text{IR}} = 1.72 \times 10^{-10} L_{\text{IR}}$ 公式计算星系红外的恒星形成率, 而在我们的样本中, $\text{SFR}_{\text{IR}} = 0.98 \times 10^{-10} L_{\text{IR}}$, 而且 $\text{SFR}_{\text{UV,uncorr}}$ 的计算他们是利用光度 L_{1500} (对应静止波段 $1500 \text{ \AA}$ 光度).

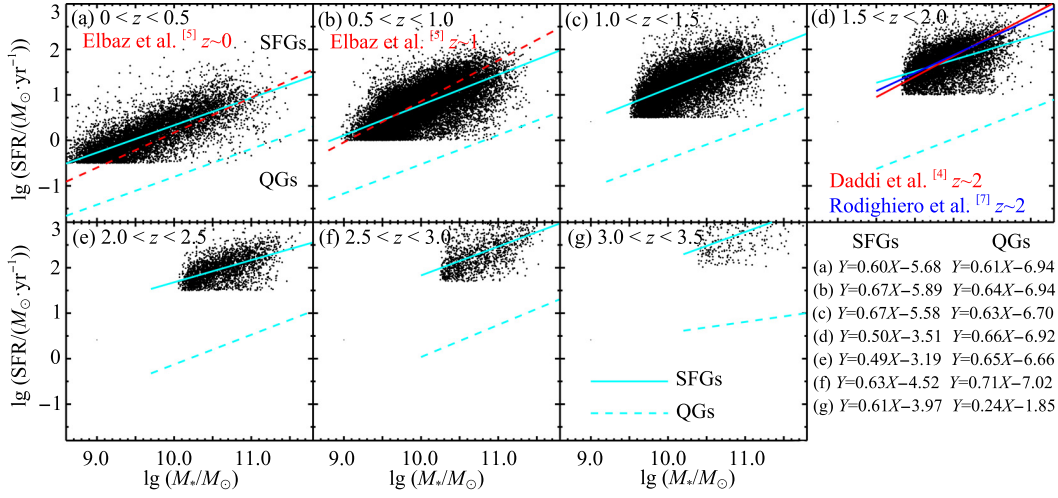


图 3 不同红移区间内星系的恒星形成率与恒星质量关系. 图中青色线和方程 ($Y = \lg \text{SFR}$, $X = \lg(M_{*}/M_{\odot})$) 是对星系线性拟合的结果 (SFGs 拟合的曲线来自 $24\ \mu\text{m}$ 探测高于 2σ 的源, 而 QGs 对应 $24\ \mu\text{m}$ 探测低于 2σ 的星系). 只有 $24\ \mu\text{m}$ 探测高于 2σ 的星系被显示在该图中. 来自文献(Elbaz 等^[5], Daddi 等^[4], Rodighiero 等^[7])结果也被显示在该图中.

Fig. 3 The relation between stellar mass and SFR in different redshift bins for SFGs. The cyan lines and the equations ($Y = \lg \text{SFR}$, $X = \lg(M_{*}/M_{\odot})$) in each panel show the linear fitting results for galaxies (SFGs: $24\ \mu\text{m}$ detected at the $> 2\sigma$ level, QGs: $24\ \mu\text{m}$ detected at the $< 2\sigma$ level). Only the SFGs that have a detection $> 2\sigma$ at $24\ \mu\text{m}$ are shown (black dots). The results from the literatures (Elbaz et al.^[5], Daddi et al.^[4], and Rodighiero et al.^[7]) are also plotted in this figure.

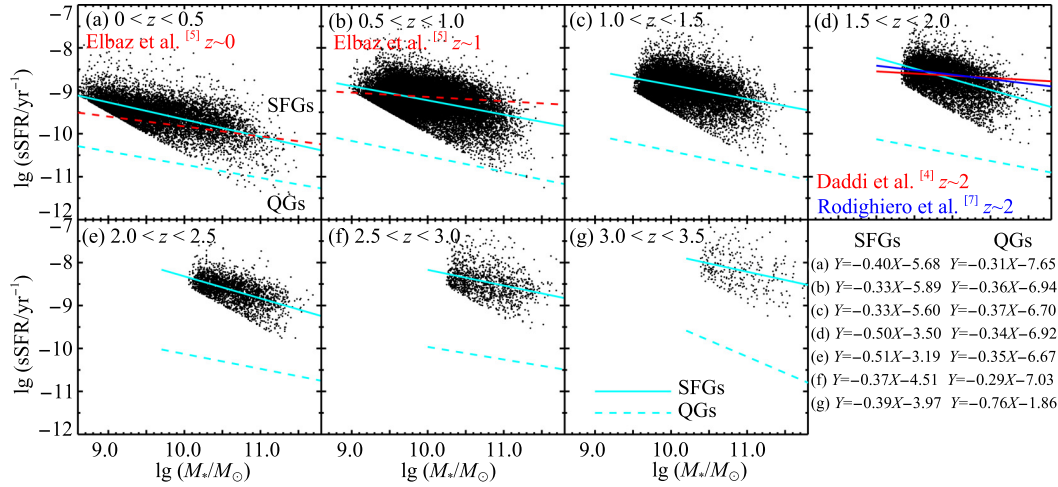


图 4 不同红移区间内星系的比恒星形成率与恒星质量关系. 图中青色线和方程 ($Y = \lg \text{sSFR}$, $X = \lg(M_{*}/M_{\odot})$) 是对星系线性拟合的结果. 只有 $24\ \mu\text{m}$ 探测高于 2σ 的星系被显示在该图中. 来自文献结果也被显示在该图中.

Fig. 4 The relation between stellar mass and sSFR in different redshift bins for SFGs. The cyan lines and the equations ($Y = \lg \text{sSFR}$, $X = \lg(M_{*}/M_{\odot})$) in each panel show the linear fitting results for galaxies.

Only the SFGs that have a detection $> 2\sigma$ at $24\ \mu\text{m}$ are shown (black dots). The results from the literatures are also plotted in this figure.

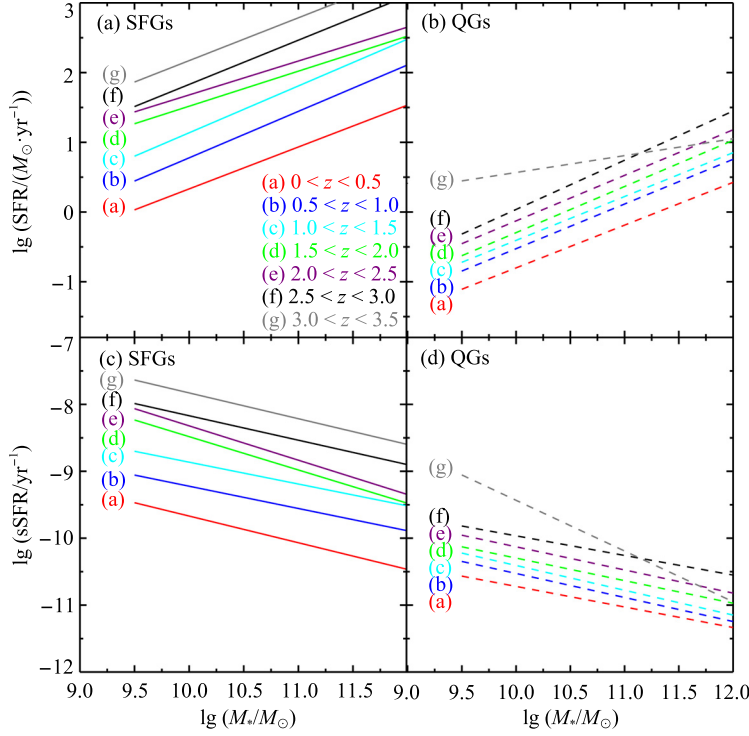


图 5 比较不同红移区间内星系的恒星形成率、比恒星形成率与恒星质量关系

Fig. 5 The comparison of SFR (sSFR) vs. M_* in different redshift bins for galaxies

从图 3、图 4 和图 5 中, 我们可以总结出如下结论: (1) 恒星形成星系的恒星形成率、比恒星形成率与恒星质量的相关性在 7 个红移区间内都存在 ($0 < z < 3.5$). (2) 在相同红移区间内和类似恒星质量的条件下, 相比较于宁静星系来说, 恒星形成星系表现出更高的 SFR 和 sSFR. (3) 恒星形成星系的主序关系有着相似的斜率 ($\beta \approx 0.5 \sim 0.7$), 而且对于某一固定的恒星质量 M_* 来说, 星系的恒星形成率 SFR 会随着红移增大而增大. 当红移从 $z \approx 0$ 变为 $z \approx 3.5$ 时, 对应的 SFR 会增大约 100 倍, 这表明在高红移处恒星形成星系更加活跃, 有激烈的恒星形成. (4) 对于某一固定的星系恒星质量来说, 星系的比恒星形成率随着红移增大而增大, 相对于高质量的星系, 低质量星系的增长更多的是通过星系本身的恒星形成. (5) 与低质量的恒星形成星系相比, 大质量的 SFGs 有很低的 sSFR, 这表明它们的恒星形成更早而且比较快速, 该点与“downsizing”模型预言一致.

5 星系比恒星形成率演化

为了研究我们样本中恒星形成星系的比恒星形成率随红移的演化关系, 我们将星系的恒星质量 M_* 划分成 6 个区间, 如图 6 所示. 在 7 个红移区间内, 我们分别计算了不同质量范围内星系的平均比恒星形成率 sSFR. 计算的结果都已经画在图 6 中, 为了不影响数据点的显示效果, 我们在图中 (“+”) 只提供了 sSFR 的统计平均误差以及红移区间的大小 (0.5). 另外, 来自不同文献中恒星形成星系的研究结果也呈现在该图中, 这些星系的恒星质量分布在 $9.5 < \lg(M_*/M_\odot) < 11.0$.

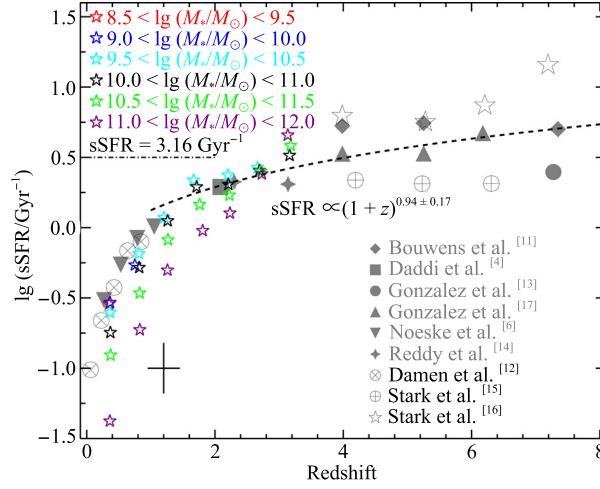


图 6 星系的平均比恒星形成率随红移演化关系. 不同颜色的五角星代表来自 COSMOS/UltraVISTA 场中 SFGs 的不同质量区间. 误差棒 (“+”) 对应的是 sSFR 1σ 置信间隔. 来自文献的数据点也被画在该图中. 基于 Daddi 等^[4], González 等^[17], Reddy 等^[14], 以及我们的数据点 ($z > 2$), 我们拟合出一个最佳曲线: $\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$ (虚线).

Fig. 6 The mean sSFR as a function of redshift for SFGs. The stars with different colors represent different M_* bins for SFGs from the COSMOS/UltraVISTA field. The error bar (“+”) is based on the 1σ confidence interval of sSFR. The data points from the literatures are also plotted in this figure. The dashed line ($\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$) corresponds to the best fit of our measured sSFR, Daddi et al.^[4], González et al.^[17], and Reddy et al.^[14] as a function of redshift at $z > 2$.

在图 6 中, 首先我们发现在相同质量区间内, 比恒星形成率 sSFR 随着红移增大而增大, 这种增长的趋势几乎是不依赖于星系恒星质量的选择. 其次我们看到在相同红移范围内的恒星形成星系, 低质量星系有更高的比恒星形成率 sSFR. 通过结合来自文献的数据结果, 我们发现相对于 $z < 2$ 的恒星形成星系来说, 更高红移 ($2 < z < 8$) 星系的 sSFR 随红移的演化趋势变弱, 即恒星形成星系的比恒星形成率在红移 2 附近发生显著的变化. 基于 Daddi 等^[4], González 等^[17], Reddy 等^[14], 以及我们的数据点 (图 6 中黑色五角星且 $2 < z < 3.5$), 我们拟合出一个最佳曲线: $\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$. 该曲线反映了在红移 $2 < z < 8$ 的范围内, 恒星形成星系的 sSFR 与红移之间的关系. 对于出现在图 6 中的观测现象, 当前的物理解释还没完全搞清楚. 有可能是在高红移低金属丰度的恒星形成星系中, 分子氢的形成效率很低, 这样就导致星系的 sSFR 不高. 也有可能是由于某种物理机制使得星系中的大量冷气体外流, 结果导致星系中比恒星形成率变低. 另一个潜在的原因是静止坐标系中光学波段星云发射线 (例如, [OII], [OIII], H α) 影响到宽波段观测流量, 从而导致星系恒星质量估算偏高, 最终使得这些更高红移星系的 sSFR 变低.

6 总结

在本工作中, 我们利用 COSMOS/UltraVISTA 场中多波段测光数据以及相应的物

理参数, 通过质量限选取了星系样本. 基于 UVJ 双色图分类判据将星系分类成恒星形成星系 (SFGs) 和宁静星系 (QGs). 研究了不同红移区间内星系的恒星形成率、比恒星形成率与恒星质量的关系. 另外, 我们也分析了不同恒星质量区间内恒星形成星系的比恒星形成率随红移的演化趋势. 通过结合来自文献中不同红移处 ($z \approx 0 \sim 8$) 恒星形成星系的 sSFR 观测数据, 研究了星系的比恒星形成率与红移之间的演化关系. 我们的主要研究结论如下:

(1) 星系恒星质量下限取得越大, 不同红移区间内 QGs 所占的比例就越高. 对于 $M_* > 10^{11} M_\odot$ 来说, 在近邻宇宙中 ($0 < z < 0.5$) 那些大质量星系主要是早型的宁静星系 (约80%), 而且在红移 $0 < z < 1.5$ 范围内, QGs 都占主导地位 ($> 70\%$).

(2) SFGs 的 SFR、sSFR 与 M_* 的相关性在 7 个红移区间内都存在 ($0 < z < 3.5$). 对于某一固定的恒星质量 M_* 来说, 星系的恒星形成率 SFR 会随着红移增大而增大. 当红移从 $z \approx 0$ 变为 $z \approx 3.5$ 时, 对应的 SFR 会增大约100 倍, 这表明在高红移处恒星形成星系更加活跃, 有激烈的恒星形成.

(3) 对于某一固定的星系恒星质量 M_* 来说, SFGs 的 sSFR 随着红移增大而增大, 相对于高质量的星系, 低质量星系的增长更多的是通过星系本身的恒星形成.

(4) 相比较于低质量的星系来说, 大质量的恒星形成星系有很低的 sSFR, 这表明它们的恒星形成更早而且经历的时标较短, 这与“downsizing”模型预言一致.

(5) 我们发现相对于 $z < 2$ 的 SFGs 来说, 更高红移 ($2 < z < 8$) 星系的 sSFR 随红移的演化趋势变弱, 即恒星形成星系的 sSFR 在 $z \approx 2$ 附近发生显著的变化. 在红移 $2 < z < 8$ 区间内, 通过结合来自文献中数据点信息, 我们拟合出一个最佳曲线: $\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$.

参考文献

- [1] Bruzual G, Charlot S. MNRAS, 2003, 344: 1000
- [2] Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. MNRAS, 2004, 351: 1151
- [3] Peng Y, Lilly S J, Kovac K, et al. ApJ, 2010, 721: 193
- [4] Daddi E, Dickinson M, Morrison G, et al. ApJ, 2007, 670: 156
- [5] Elbaz D, Daddi E, Le Borgne D, et al. A&A, 2007, 468: 33
- [6] Noeske K G, Weiner B J, Faber S M, et al. ApJ, 2007, 660: L43
- [7] Rodighiero G, Daddi E, Baronchelli I, et al. ApJ, 2011, 739: 40
- [8] Fang G W, Kong X, Chen Y, et al. ApJ, 2012, 751: 109
- [9] Zheng X Z, Bell E F, Papovich C, et al. ApJ, 2007, 661: L41
- [10] Dunne L, Ivison R J, Maddox S, et al. MNRAS, 2009, 394: 3
- [11] Bouwens R J, Illingworth G D, Oesch P A, et al. ApJ, 2012, 754: 83
- [12] Damen M, Förster Schreiber N M, Franx M, et al. ApJ, 2009, 705: 617
- [13] González V, Labbé I, Bouwens R J, et al. ApJ, 2010, 713: 115
- [14] Reddy N A, Pettini M, Steidel C C, et al. ApJ, 2012, 754: 25
- [15] Stark D P, Ellis R S, Bunker A, et al. ApJ, 2009, 697: 1493
- [16] Stark D P, Schenker M A, Ellis R, et al. ApJ, 2013, 763: 129
- [17] González V, Bouwens R, Illingworth G, et al. ApJ, 2014, 781: 34
- [18] Cowie L L, Songaila A, Hu E M, et al. AJ, 1996, 112: 839
- [19] Scoville N, Aussel H, Brusa M, et al. ApJS, 2007, 172: 1
- [20] Muzzin A, Marchesini D, Stefanon M, et al. ApJS, 2013, 206: 8

- [21] Brammer G B, van Dokkum P G, Coppi P. ApJ, 2008, 686: 1503
- [22] Lilly S J, Le Fèvre O, Renzini A, et al. ApJS, 2007, 172: 70
- [23] van Dokkum P G, Labbé I, Marchesini D, et al. PASP, 2009, 121: 2
- [24] Kriek M, van Dokkum P G, Labbé I, et al. ApJ, 2009, 700: 221
- [25] Calzetti D, Armus L, Bohlin R C, et al. ApJ, 2000, 533: 682
- [26] Chabrier G. PASP, 2003, 115: 763
- [27] Kennicutt R C. ARA&A, 1998, 36: 189
- [28] McCracken H J, Milvang-Jensen B, Dunlop J, et al. A&A, 2012, 544: 156
- [29] Patel S G, van Dokkum P G, Franx M, et al. ApJ, 2013, 766: 15
- [30] Ilbert O, McCracken H J, Le Fèvre O, et al. A&A, 2013, 556: 55
- [31] Muzzin A, Marchesini D, Stefanon M, et al. ApJ, 2013, 777: 18

The Star-forming Evolution of Galaxies with Redshift in the COSMOS Field

FANG Guan-wen^{1,2} MA Zhong-yang^{2,3} CHEN 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 Center for Astrophysics, 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, we have constructed a mass-limited sample of galaxies at redshift $z \sim 0 - 3.5$. Based on the rest-frame UVJ ($U-V$ vs. $V-J$) color criteria, we classify the sample of galaxies into the star-forming galaxies (SFGs) and the quiescent galaxies (QGs) in different redshift bins. In the redshift range $0 < z < 1.5$, the fraction of QGs with $M_* > 10^{11} M_\odot$ is more than 70%. We find the star formation rate (SFR) and the stellar mass of SFGs show main sequence (MS) relations in all redshift bins. Moreover, the SFR and specific SFR (sSFR) of SFGs increase with redshift at all masses, indicating that the SFGs were much more active on average in the high-redshift universe. Meanwhile, the sSFR of massive SFGs is lower at redshift $z \sim 0 - 3.5$, implying that the star formation contributes more to the mass growth of low-mass SFGs than to high-mass SFGs. By combining with data from literatures, we find that the evolution of the sSFR with redshift at redshift $z \sim 2 - 8$ follows $\text{sSFR} \propto (1+z)^{0.94 \pm 0.17}$.

Key words galaxies: star formation, galaxies: fundamental parameters, galaxies: evolution, methods: data analysis