

# 团星系和场星系的恒星形成性质

何莹莹, 袁启荣

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 通过对团星系和场星系的聚度参数、特征恒星形成率、星系中包含的恒星质量、金属丰度等物理参量的比较, 研究了处在不同引力环境中星系的恒星形成性质. 研究表明, 聚度高的星系主要居于星系团中, 大部分低质量星系是场星系, 星系的特征恒星形成率与恒星质量和金属丰度之间存在着显著的相关. 另外, 团星系和场星系在红移小于 0.1 的范围内仍表现出了明显的宇宙学演化效应.

[关键词] 星系, 星系团, 恒星形成率, 恒星质量, 金属丰度

[中图分类号] P157.8 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2007)02-0037-05

## Star Formation Properties of Cluster and Field Galaxies

He Yingying Yuan Qirong

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract** By comparing the physical parameters of cluster and field galaxies, such as concentration index, specific star formation rate, stellar mass, and metallicity, the star formation properties of galaxies with in different gravitational environments are studied. It is shown that highly concentrated galaxies dominate in galaxy clusters, and less massive galaxies are predominately field galaxies. The correlations of the specific star formation rate with stellar mass and metallicity are found. Additionally, both field and cluster galaxies with  $z < 0.1$  show significant effect of cosmic evolution.

**Key words** galaxies, cluster, star formation rate, stellar mass, metallicity

## 0 引言

星系的最基本的特征关系之一是形态-密度关系, 即椭圆星系比盘状星系和不规则星系更多地居于密度较高的环境中. 这种关系首先由 Dressler<sup>[1]</sup> 提出, 随后许多研究都验证了这种关系的存在. 一个极端的情况是, 在星系团中心区域由早型星系主导着, 而蓝色的晚型星系主要孤立地分布在星系团之间的场中或者居于星系团的外围区域. 另一个与环境紧密相关的重要观测量是星系的恒星形成率 (star formation rate, SFR), 处在低密度的环境中的星系的恒星形成活动比高密度环境中的要活跃<sup>[2-4]</sup>. 在星系团环境中, 其中心早型星系的恒星形成率很低 (几乎接近零), 而星系团外围的晚型星系的恒星形成活动比较活跃.

此外, 星系的其他物理特性 (如星系中包含的恒星总质量、星系光度、星系颜色、星系结构参数等) 都与环境有关. 大质量、红色、高光度的星系多居于高密度的团星系中, 而小质量、蓝色、低光度的星系多居于低密度的场星系中<sup>[5]</sup>. 不仅星系的许多特征与引力环境密切相关, 星系的许多物理特性之间也存在着很强的联系. Kauffmann 等<sup>[6]</sup> 基于 SDSS 数据对星系的各種物理特征之间的联系做了详细的研究. 研究表明, 几乎所有的星系物理特征都很强地依赖于星系中包含的恒星质量 ( $M_*$ ): 大质量的星系年龄大、质光比高、恒星形成率低、聚度参数高、表面质量密度高且通常含有活动星系核 (AGN), 而小质量的星系则相反. 此外, 星系中的恒星质量与金属丰度之间也有很强的相关性.

收稿日期: 2006-12-27 修回日期: 2007-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (10633020) 资助项目.

作者简介: 何莹莹 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事天体物理的学习与研究. E-mail: yingnatur@126.com

通讯联系人: 袁启荣 (1968-), 教授, 博士生导师, 主要从事天体物理的教学与研究. E-mail: yuanqirong@njnu.edu.cn

解释这些物理特征之间的相关性是很困难的. 但是, 通过对大样本星系的研究, 我们可以进一步研究这些物理特征的环境效应和演化效应. 本文旨在利用 SDSS 星系的大样本, 比较星系团成员星系 (简称团星系) 和场星系的物理特性之间的显著差异, 从而探讨环境密度如何影响这些物理特性的.

1 数据的获得

近年来, Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 的数据释放在研究星系的恒星形成活动提供了一个很大的星系样本. Kauffmann 等利用 SDSS DR2 (第二次释放) 的数据, 对星系的恒星形成性质进行了大样本的研究<sup>[3 7 9]</sup>. 这些研究根据新的星族演化合成模型, 对几十万颗星系的恒星质量、恒星形成率、发射线流量、金属丰度等参量进行了估计, 得到每个参量的最或然值和误差范围. 最近, 他们又对样本进行了扩充和更新. 本文的工作就是使用这些与星系的恒星形成有关的物理参数, 对场星系和团星系的恒星形成性质进行比较.

我们采用 Kauffmann 等<sup>[6]</sup>所用的数据, 星系所处的环境密度可以用距离该星系大约  $1 h^{-1} \text{Mpc}$  范围内所包含的邻近星系数目 ( $N$ ) 来定义. 该样本的星等范围为  $14.5 < r < 17.77$ , 红移的范围为  $0.03 < z < 0.1$ . 我们保守地选择  $N = 0$  的星系为场星系, 选择  $N > 17$  的星系为团星系, 并从 Kauffmann 等的研究<sup>[3 9 10]</sup>中提取出这些星系的与恒星形成有关的物理参量, 最后得到 7 559 颗场星系和 1 852 颗团星系.

首先, 我们利用光谱形态参数  $D_n(4000)$  和星系光度聚度参数  $C = R_{p,90}/R_{p,50}$  对这些场星系和团星系进行形态分类.  $D_n(4000)$  是星系光谱在  $4000 \times 10^{-10} \text{m}$  处跃变的强度, 一定意义上可以反映一个星系的形态信息. Padmanabhan 等<sup>[10]</sup>曾经把  $D_n > 1.6$  作为选取椭圆星系的一个重要判据. 另一个与星系形态密切关联的参数是星系的聚度值  $C = R_{p,90}/R_{p,50}$ , 它表示在  $r$  波段包含星系光度的 90% 和 50% 处的两个半径的比值. Shin'asaku 等<sup>[11]</sup>发现, 大部分满足  $C > 2.6$  的星系是早型星系, 而旋涡星系和不规则星系的聚度值则在  $2.0 < C < 2.6$  的范围内. 因此, 我们选取  $D_n > 1.6$  且  $C > 2.6$  的星系为早型星系, 而  $D_n < 1.6$  且  $C < 2.6$  的星系为晚型星系. 最后得到场星系中有 1 880 颗早型星系和 4 107 颗晚型星系, 团星系中有 1 076 颗早型星系和 374 颗晚型星系. 文中使用的宇宙学参数是  $\Omega_m = 0.3$   $\Omega_\Lambda = 0.7$   $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ .

2 结果分析

2.1 聚度参数 C 的分布

本文仅研究两种极端密度环境中的星系: 场星系和团星系. 图 1 是场星系和团星系的聚度参数  $C$  的百分比分布图 (图中的实线表示团星系, 虚线表示场星系). 从图中可以看出, 大部分场星系的聚度参数偏小, 聚度峰值出现在 2.3 而星系团中的星系的聚度值偏大, 峰值出现在 2.7. 若将  $C = 2.6$  作为区分早型星系和晚型星系的边界<sup>[11]</sup>, 由图 1 得出, 在场星系中晚型星系居多, 而团星系中早型星系居多, 从而说明晚型星系多存在于低密的环境中, 而早型星系多存在于高密度环境中.

形态-密度关系的物理机制和物理过程很复杂, 一方面星系间的合并或潮汐相互作用可以触发星系内的恒星形成, 加速消耗星系中的气体, 另一方面又可以剥离星系盘中的气体物质, 从而摧毁星系的盘状结构. 在致密引力环境下, 星系的演化结果是, 一部分旋涡星系或不规则星系变得越来越密集, 所含的气体越来越少, 从形态上变成椭圆星系或透镜星系.

2.2 特征恒星形成率与恒星质量的关系

特征恒星形成率是用来表征不同质量的星系的恒星形成活动剧烈程度的物理参数, 定义为恒星形成率与星系包含的恒星总质量之比 (即  $\text{SFR } M_\odot$ ). 图 2 表示场星系 (左图) 和团星系 (右图) 中的晚型星系的特征恒星形成率 ( $\text{SFR } M_\odot$ ) 随质量 ( $M_\odot$ ) 变化的关系图. 图中的

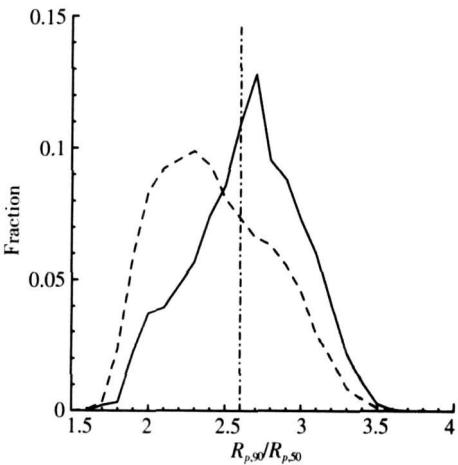


图 1 团星系(实线)和场星系(虚线)的聚度参数 C 的百分比分布图

Fig.1 The fraction of the concentration parameter C for cluster galaxies (solid) and field galaxies (dashed)

直线表示线性拟合, 左下角给出了物理量的典型误差值. 对场星系线性拟合的结果是  $\log(\text{SFR } M_*) = -0.279 (\pm 0.010) \log M_* - 7.128 (\pm 0.110)$ , 相关系数为  $-0.370$   $\text{SFR } M_*$  的弥散度为  $0.313$  对团星系的拟合结果为  $\log(\text{SFR } M_*) = -0.168 (\pm 0.039) \log M_* - 8.373 (\pm 0.398)$ , 相关系数为  $-0.217$   $\text{SFR } M_*$  的弥散度为  $0.325$  可以看出, 相比于团星系, 场星系保持了较强的  $\text{SFR } M_* - M_*$  相关性, 这是由于场星系中的恒星形成活动没有受到周围星系场的影响, 保持了相对独立的演化趋势. 而星系团中的星系间引力潮汐和并合作用改变了星系的恒星形成活动, 使团星系的  $\text{SFR } M_*$  值出现了较大的涨落.

另外, 从图 2 中可以发现, 场星系中的晚型星系的斜率比团星系中晚型星系的斜率明显要陡, 即场星系的恒星形成活动随其包含的恒星总质量 ( $M_*$ ) 的增加而受到的抑制效应更强. 在相同质量的情况下场星系的恒星形成率比团星系的高, 表明团星系的恒星形成是受到抑制的. 绝大部分低质量星系 (即  $M_* < 3 \times 10^9 M_\odot$ ) 是场星系, 其特征恒星形成率较高. 根据宇宙大尺度结构的等级成团理论, 星系团是随着时间不断吸积周围的场星系而形成的. 当场星系进入一个致密的环境中时, 它们的恒星形成活动就会受到一些物理机制 (如星系团中星系之间的引力相互作用、星系际介质和星系内部的星际介质的摩擦、潮汐作用等) 的制约, 导致星系内部提供恒星形成的气体被剥离而减少, 恒星形成活动将慢慢衰减.

值得注意的是, 星系间的相互并合有可能会激发星系内部的恒星形成, 加速消耗星系内部的气体, 使得星系的恒星形成率在一定演化阶段内显著上升. 但我们在团星系大样本统计 (见图 2 的右图) 中并没有看到团星系的特征恒星形成率有明显抬升, 这是因为即使在星系团中, 正在进行剧烈并合的星系毕竟是少数. 有些团星系曾经经历过剧烈的星系并合, 气体已经提前消耗殆尽; 还有些团星系虽然没有经历星系并合, 但星系内部的星际气体在和星系团内的星系际气体的摩擦 (harassment) 和潮汐作用的过程中被逐渐剥离了. 所以, 大多数团星系的恒星形成活动是受到了致密引力环境的抑制.

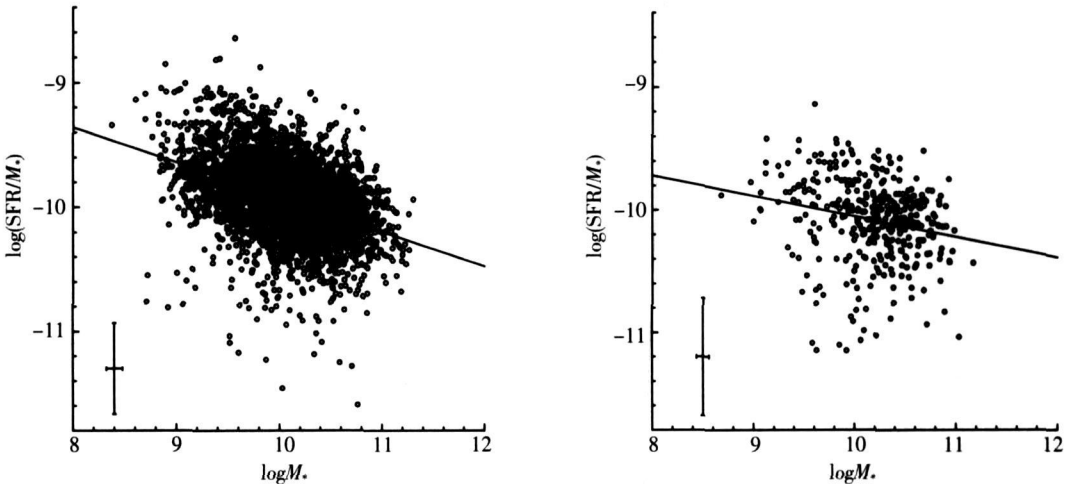


图 2 场星系 (左图) 和团星系 (右图) 的  $\text{SFR}/M_* - M_*$  关系图

Fig.2 Relation between specific SFR and stellar mass for field galaxies (left) and cluster galaxies (right)

2.3 金属丰度与恒星质量之间的关系

星系包含的恒星质量 ( $M_*$ ) 和金属丰度 ( $[O/H]$ ) 是星系的基本物理特征, 都能用来衡量星系的演化过程. 其中,  $M_*$  描述了星系在演化过程中一共形成了多少质量的恒星, 而星系的金属丰度则描述了星系的化学演化进程. 理解这两个物理量随时间的演化以及它们之间的相互关系有助于了解星系的形成和演化过程. 由于星系光谱中的氧吸收线容易探测到, 我们通常用氧元素的相对丰度来表示星系的金属丰度. 图 3 是我们样本中场星系 (左图) 和团星系 (右图) 中的晚型星系金属丰度与恒星质量的关系图, 直线是线性拟合, 右下角给出了物理量的典型误差值. 对场星系样本的线性拟合结果为:  $12 + \log[O/H] = 0.321 (\pm 0.005) \log M_* + 5.699 (\pm 0.050)$ , 相关系数为  $0.760$  金属丰度的弥散度为  $0.117$  团星系的线性拟合结果为:  $12 + \log[O/H] = 0.278 (\pm 0.017) \log M_* + 6.168 (\pm 0.172)$ , 相关系数为  $0.754$  金属丰度弥散度为  $0.105$  可以看出, 场星系和团星系的金属丰度与恒星质量之间存在着明显的相关性, 且二者的相关系数几乎相等.

恒星质量与金属丰度之间的相关性反映了星系的总体质量对星系化学演化起着重要的作用. 我们的

解释是,大质量的星系比小质量的星系能够更持久有效地保留气体,因此金属丰度能够增加到更高的值;而质量越小的星系越不容易保留气体和恒星喷出物,将以物质外流的形式丢失金属.

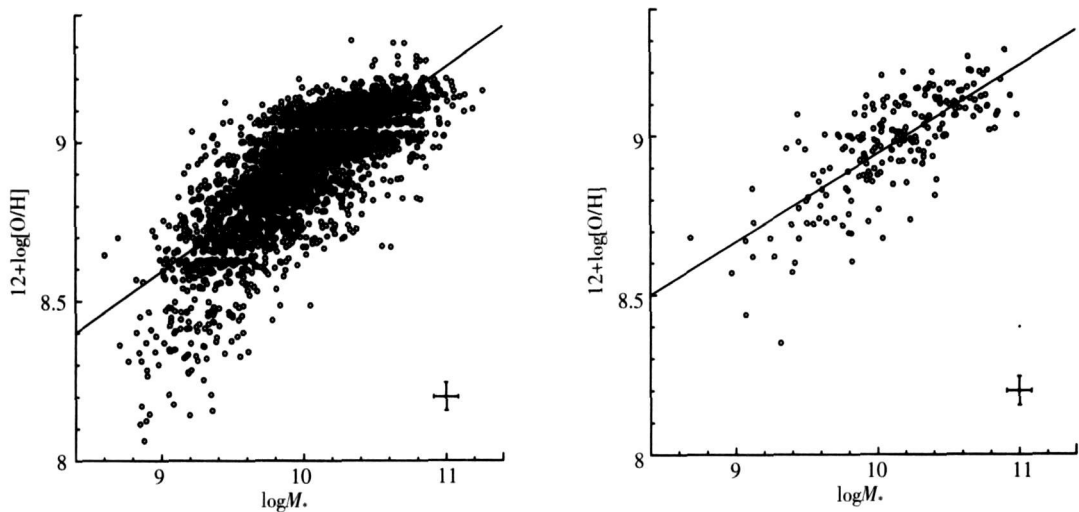


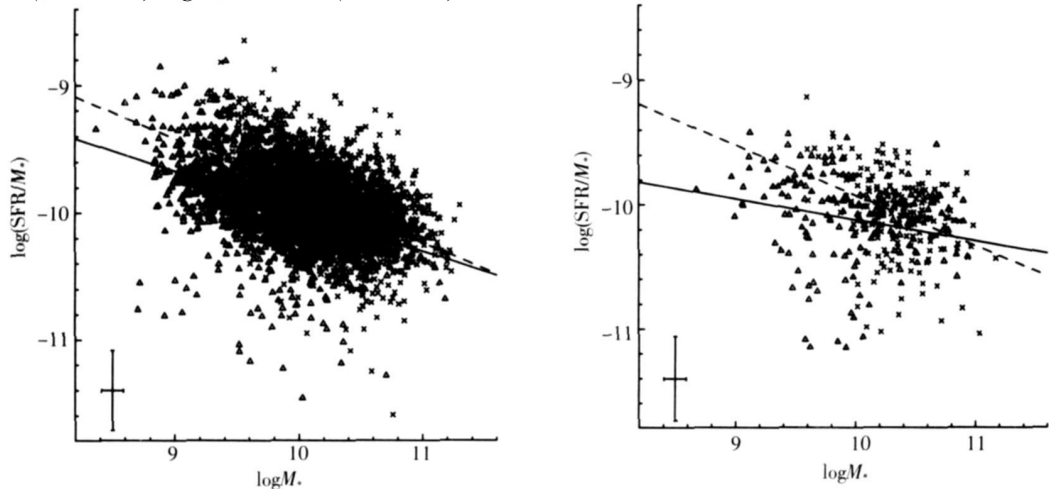
图 3 场星系(左图)和团星系(右图)的恒星质量和金属丰度的关系图

Fig.3 Relation between metallicity and stellar mass for field galaxies (left) and cluster galaxies (right)

2. 4 恒星形成与红移的关系

星系的恒星形成活动可能存在宇宙学演化,即星系 SFR 与星系的红移有关. Butther& Oem ler<sup>[12]</sup>发现星系团中蓝色星系的占比跟星系团的红移有关, Finn<sup>[13]</sup>发现  $z \sim 0.8$  的星系团比  $z \sim 0.2$  的星系团的恒星形成率要高 10 倍多. Bauer 等人<sup>[14]</sup>的研究也表明星系的特征恒星形成率 ( $SFR M_*$ ) 随着红移的增加而不断增加,从  $z \sim 1$  到现在已经降了 10 倍多. 这些研究表明星系演化过程中诸如合并之类的等级成团过程的重要性.

我们的样本星系的红移范围是  $0.03 < z < 0.1$ , 虽然在该样本中星系 SFR 的宇宙学演化效应可能不太明显,但我们仍然可以用来判断近邻星系的 SFR 是否存在着宇宙学演化. 我们将场星系和团星系样本按红移分成星系数目相当的两个子样本: 近星系 ( $0.03 < z < 0.07$ ) 和远星系 ( $0.07 < z < 0.1$ ). 图 4 给出了这两个子样本的  $SFR M_* - M_*$  关系. 从图中可以看出,远星系样本比近星系样本具有较高的平均恒星质量 ( $M_*$ ). 对于左图表示的场星系样本,近星系的线性拟合(实线)是  $\log(SFR M_*) = -0.315(\pm 0.017) \log M_* - 6.833(\pm 0.167)$ , 相关系数为  $-0.389$  远星系的线性拟合(虚线)是  $\log(SFR M_*) = -0.408(\pm 0.017) \log M_* - 5.743(\pm 0.172)$ , 相关系数为  $-0.473$  对于具有相同质量的场星系,远星系的



图中三角形表示  $0.03 < z < 0.07$  的星系,实线是其线性拟合,叉号表示  $0.07 < z < 0.1$  的星系,虚线是其线性拟合. 左下角给出了物理量的典型误差值

图 4 场星系(左图)和团星系(右图)的  $SFR/M_* - M_*$  关系随红移变化的关系图

Fig.4 The specific SFR and stellar mass relations for field galaxies (left) and cluster galaxies (right) in two redshift regions

特征恒星形成率比近星系要高些. 另外, 远的场星系的  $\text{SFR} M^* - M^*$  关系有强的线性相关, 其恒星形成活动随恒星质量增大而受到抑制的效应更加显著 (斜率更陡). 右图中的团星系子样本显示出了类似的结果. 因此, 对于红移小于 0.1 的场星系和团星系, 星系的恒星形成活动仍然存在着明显的宇宙学演化.

### 3 结论

为了研究处在不同密度环境中的星系的恒星形成性质, 我们对比分析了场星系和团星系样本的聚度参数、星系中包含的恒星质量、特征恒星形成率、金属丰度等与恒星形成有关的物理参量, 并考察了星系特征恒星形成率与星系质量的关系及其宇宙学演化效应. 我们得到如下结论: (1) 团星系的聚度参数比场星系的高; (2) 绝大部分低质量星系 (即  $M^* < 3 \times 10^9 M_\odot$ ) 是场星系; (3) 相同质量的场星系比团星系有更高的特征恒星形成率, 表明在星系团中的星系的恒星形成是受到抑制的; (4) 场星系的特征恒星形成率与质量之间的线性关系更强; (5) 星系金属丰度与恒星质量之间存在着明显的相关性, 且场星系和团星系的线性相关程度几乎一样; (6) 远星系样本比近星系样本具有较高的平均恒星质量; (7) 在低红移的范围 ( $z < 0.1$ ) 内, 恒星形成率随红移而增加的趋势仍然存在.

### [参考文献]

- [1] Dressler A. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies[J]. The Astrophysical Journal 1980, 236: 351-365.
- [2] Strateva Irina, Ivezić Željko, Knapp Gillian R, et al. Color separation of galaxy types in the Sloan Digital Sky Survey imaging data[J]. The Astronomical Journal 2001, 122 (4): 1861-1874.
- [3] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for  $10^5$  low-redshift galaxies[J]. Monthly Notes of Royal Astron Society 2003, 341(1): 54-69.
- [4] Abilio M Jr, Laerte S Jr. Star formation and the environment of nearby field galaxies[J]. Monthly Notes of Royal Astron Society 2004, 349(4): 1251-1262.
- [5] Blanton Michael R, Eisenstein Daniel, Hogg David W, et al. Relationship between environment and the broad-band optical properties of galaxies in the SDSS[J]. The Astrophysical Journal 2005, 629(1): 143-157.
- [6] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies[J]. Monthly Notes of Royal Astron Society 2004, 353(3): 713-731.
- [7] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. Stellar masses and star formation histories for  $10^5$  galaxies from the Sloan Digital Sky Survey[J]. Monthly Notes of Royal Astron Society 2003, 341(1): 33-53.
- [8] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. The host galaxies of active galactic nuclei[J]. Monthly Notes of Royal Astron Society 2003, 346(4): 1055-1077.
- [9] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. The origin of the mass-metallicity relation: Insights from 53 000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey[J]. The Astrophysical Journal 2004, 613(2): 898-913.
- [10] Padmanabhan N, Kauffmann G, Brinchmann J, et al. Stellar and dynamical masses of ellipticals in the Sloan Digital Sky Survey[J]. New Astronomy 2004, 9(5): 329-341.
- [11] Shimasaku K, Fukugita M, Doi M, et al. Statistical properties of bright galaxies in the Sloan Digital Sky Survey photometric system[J]. The Astronomical Journal 2001, 122(3): 1238-1250.
- [12] Butcher H, Oemler A Jr. The evolution of galaxies in clusters: V-A study of populations since  $z$  approximately equal to 0.5[J]. The Astrophysical Journal 1984, 285: 426-438.
- [13] Finn Rose A, Zaritsky Dennis, McCarthy Donald W. H $\alpha$  derived star formation rates for the  $z = 0.84$  galaxy cluster Cl J0023+0423B[J]. The Astrophysical Journal 2004, 604(1): 141-152.
- [14] Bauer A E, Drory N, Hill G J, et al. Specific star formation rates to redshift 1.5[J]. The Astrophysical Journal 2005, 621(2): 89-92.

[责任编辑: 丁 蓉]