

# 晚型旋涡星系盘的颜色梯度与结构参数的 相关关系

李化南<sup>†</sup> 郑晓光

(吉林师范大学物理学院 四平 136000)

**摘要** 从 Sloan 数字巡天第 2 批释放的数据 (SDSS DR2) 中选择了 395 个在 r 波段亮于 15 等的面向晚型旋涡星系作为样本, 研究了盘的颜色梯度与结构参数的关系. 结果表明: 盘的颜色梯度与盘的绝对星等 (质量) 无关; 盘的颜色梯度与盘的尺度有关, 越大的盘颜色梯度越陡; 盘的颜色梯度与盘的颜色有关, 越蓝的盘颜色梯度越陡; 盘的颜色梯度与盘的表面亮度有关, 越亮的盘颜色梯度越陡, 并简单讨论了盘的颜色梯度与各结构参数的相关关系对晚型旋涡星系盘恒星形成历史的约束.

**关键词** 星系: 旋涡, 星系: 基本参数

**中图分类号:** P 157; **文献标识码:** A

## 1 引言

径向颜色分布是星系化学演化和测光分析最重要的观测约束之一. 对于旋涡星系来说, 径向颜色梯度是其盘的形成及化学演化历史的反映, 这对于研究旋涡星系的形成和演化具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>. 大量观测表明, 颜色梯度在旋涡星系中普遍存在, 几乎所有旋涡星系的颜色都随着半径的增大越来越蓝, de Jong<sup>[3]</sup>、Cunow<sup>[4]</sup>、Elmegreen 等<sup>[5]</sup> 都证实了这一点. Kim 等<sup>[2]</sup> 在研究 103 个不同类型星系的颜色梯度时发现颜色梯度与星系的绝对星等有很弱的相关性. 盘星系可以分成核球和盘两部分, 要想研究盘部分的颜色梯度必须去除核球的影响. de Jong<sup>[3]</sup> 在研究 86 个面向旋涡星系的径向颜色分布时, 把星系分为核球和盘两部分并研究了盘部分的颜色梯度, 没有发现盘的颜色梯度与结构参数有相关关系. Taylor 等<sup>[6]</sup> 在 2005 年以 142 个晚型旋涡星系、不规则星系和特殊星系做为样本, 把星系在有效半径 ( $R_e$ ) 处分成两部分, 认为外部为盘成分, 结果显示晚型旋涡星系、不规则星系以及特殊星系都是颜色随半径增大越来越红. 而且他们认为这样的结果是由于恒星族梯度引起的, 而不是受尘埃消光的影响.

本文的结构如下: 首先在 SDSS 多色测光资料中进行样本的选择, 并对选择的样本星系进行核球与盘的分解, 然后介绍颜色梯度的计算, 并进行盘的颜色梯度与各结构参数的相关性分析, 最后我们给出了本文的主要结论并对结论作了简要讨论.

2010-04-07 收到原稿, 2010-05-12 收到修改稿

<sup>†</sup> hnlijiyong@163.com

## 2 样本选择与数据处理

### 2.1 SDSS 测光数据介绍

SDSS 采用漂移扫描模式对天体在  $u$ 、 $g$ 、 $r$ 、 $i$ 、 $z$  5 个光学波段进行巡天测光观测, 并对其中的一部分进行光谱观测. 本文所用的数据来源于 SDSS DR2. SDSS DR2 的测光覆盖了北半天球 3 324 平方度的天区. SDSS 释放的数据给出了星系在 5 个波段的表面亮度轮廓, 分别用 15 个不同半径处圆环内的平均表面亮度表示 (ProfMean), 具体的圆环半径可参考文献 [7] 中的表 7. 基于 ProfMean 的数据, 我们可以考察单个星系的光度和颜色在径向的分布. SDSS 还提供了个别星系的聚度 ( $C = R_{90}/R_{50}$ , 这里  $R_{90}$  和  $R_{50}$  分别指包含 90% 和 50% 的 Petrosian 光度处的半径)、轴率  $q$  ( $q = b/a$ ,  $a$  与  $b$  分别是星系半长轴与半短轴)、星系的总光度等许多其它重要测光参数 [7].

SDSS 测光虽然有 5 个光学波段, 但由于  $u$  波段露光太短 [7], 而  $i$  波段又存在 CCD 的红晕效应影响 [8], 不利于颜色分布研究, 所以我们仅选择  $g$ 、 $r$ 、 $z$  波段, 分别对  $g-r$ 、 $r-z$  和  $g-z$  作颜色梯度与结构参数相关关系的研究. 因为  $r$  波段是 SDSS 进行测光处理的基准波段和选择光谱样本的参考波段, 所以在以下讨论中, 如果不加特殊说明, 所有参量都是指  $r$  波段.

### 2.2 样本选择

因为我们研究的是旋涡星系盘部分的颜色梯度, 所以要求样本星系符合以下条件: 一是要有较准确的测光; 二是要有相对较大的视半径, 能有效区分星系在径向上的结构; 三是能最大限度地减小尘埃的影响; 四是样本星系要有比较小的核球, 即晚型旋涡星系.

为了得到较准确的测光和较大的视半径, 并最大限度地减小尘埃对颜色的影响, 我们在 SDSS 多色测光资料中进行样本的初步选择, 即选择面向的、在  $r$  波段亮于 15 等的星系作为样本. 其中选择面向星系的判据是轴率  $q > 0.75$  (轴率 0.75 对应的倾角约为  $41^\circ$ ) [9]. 依据这样的条件选出 1 543 个面向星系, 并对其进行核球和盘两成份的拟合 (拟合过程详见文献 [10-11]). 通过对 1 543 个面向星系做核球和盘两成份的拟合, 我们得到了每个星系结构的参数. 比如: 核球和盘的光度比 (bulge-to-disk ratio, 简称 B/D)、每个环内核球成份和盘成份的光度比等. 在对多个波段分别进行拟合后, 还能得到核球的颜色、盘的颜色等信息.

研究表明以星系的聚度参数  $C = 2.6$  大致可以将星系划为早型星系 ( $C > 2.6$ ) 和晚型星系 ( $C < 2.6$ ), 我们以聚度  $C < 2.5$  和  $-2.5\lg(B/D) > 0.5$  为条件 [12] 来选取晚型旋涡星系, 共找到了 480 个星系. 另外我们发现在  $g$  波段和  $z$  波段对星系的表面亮度进行拟合时, 得到有些结构参数差别过大, 例如, 不同波段拟合的 B/D 并非完全相同, 这有可能是拟合本身带来的问题, 毕竟只用了一维的信息, 而且对于大部分星系来说只有 10 或 11 个圆环的测光数据. 从图 1~2 中可以看出不同波段拟合的相关性. 两图的横坐标是用  $r$  波段拟合后的结构参数 B/D, 纵坐标分别是  $g$  波段和  $z$  波段拟合后的结构参数 B/D.

图中“x”是符合得不好的星系，“o”表示不同波段 B/D 基本符合的星系. 为了使样本更纯净, 我们剔除了在 g、r、z 3 个波段拟合后参数 B/D 明显不相符的星系, 最终样本中包含了 395 个面向旋涡星系.

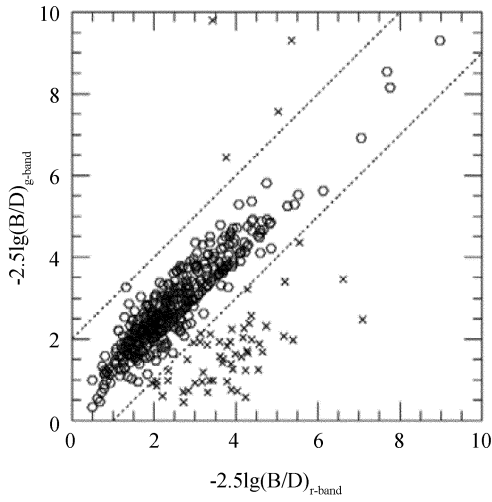


图 1 r 波段和 g 波段结构参数 B/D 的相关性分布  
Fig.1 Correlation of parameters B/D in r band and g band

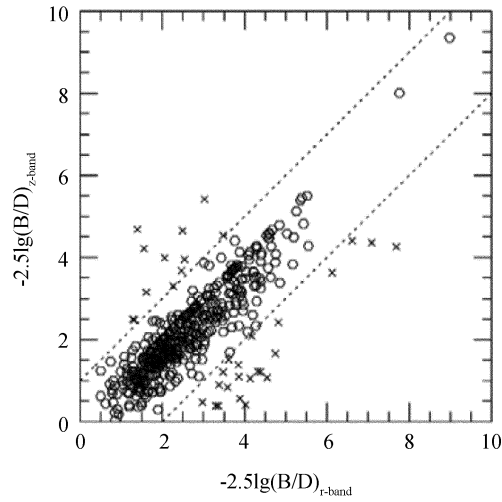


图 2 r 波段和 z 波段结构参数 B/D 的相关性分布  
Fig.2 Correlation of parameters B/D in r band and z band

### 2.3 数据处理

要讨论盘的颜色梯度和盘的绝对星等、尺度、颜色以及表面亮度这几个结构参数的相关关系, 首先要计算出盘的颜色梯度和这几个结构参数. 我们采用构建一个“标准星系”的方法对盘的颜色梯度进行计算<sup>[13]</sup>. 对于绝对星等的计算, 首先要将视星等转化到绝对星等, 同时还要进行银河系消光和 K 改正. SDSS 数据中已给出了银河系消光的改正值, 是根据 Schlegel 等<sup>[14]</sup> 计算的. 星系的绝对星等  $M_r$  由下式给出:

$$M_r = m - 5\lg D_L - 25 - K(z), \quad (1)$$

其中  $m$  是该波段的视星等,  $D_L$  是星系的光度距离,  $K(z)$  是 K 改正, 本文的 K 改正直接选用了 Blanton 等<sup>[15]</sup> 的结果. 为了讨论盘的颜色梯度与颜色的关系, 又从颜色 g-r、r-z 和 g-z 中选择了被定义为盘成分的环的数目大于或等于 2 的星系, 计算了盘的颜色, 3 种颜色星系的数目分别是 261、258 和 228 个. 由于无法直接得到观测量, 盘的星等用两成分拟合得到的模型光度来表示, 盘的颜色为模型星等的差, 即  $C_{\text{disk}} = m_{1,\text{disk}} - m_{2,\text{disk}}$ .

本文采用颜色梯度  $CGs = \Delta c / \Delta R$  这种形式来讨论颜色梯度与盘的绝对星等、尺度、颜色以及表面亮度之间的相关关系. 我们对盘的颜色梯度与各参数关系做 Spearman 秩相关分析和 t 检验<sup>[16]</sup>. 以  $P = 1 - \alpha$  表示 ( $\alpha$  为检验水准), 当  $\alpha = 0.05$  时, 置信度  $P = 0.95$ . 当 t 检验统计值大于临界值  $t_\alpha(\alpha = 0.05)$  时, 接受原假设即梯度与参数存在相

关关系, 如果存在显著的相关性, 我们还给出了最佳线性拟合的斜率(最小二乘法); 而当  $t$  检验统计值小于临界值  $t_\alpha(\alpha = 0.05)$  时, 不接受原假设即梯度与参数不存在相关关系.

### 3 拟合结果

#### 3.1 盘的颜色梯度与盘的绝对星等的关系

图 3 是盘的颜色梯度与盘的绝对星等相关关系示意图. 图中的横坐标是盘在  $r$  波段的绝对星等, 纵坐标分别是  $g-r$ 、 $r-z$  和  $g-z$  3 个颜色所对应的梯度 CGs. 图中每个数据点代表一个星系. 表 1 中  $r_s$  是秩相关系数. 从图 3 以及表 1 中可以发现: 盘的颜色梯度与盘的绝对星等仅在  $g-r$  波段有极弱的相关关系, 即越亮的星系颜色梯度越陡. 而在另外两个波段都没有相关关系. 这与文献 [2-3,17] 的研究结果是一致的. 我们会在 3.2 节作讨论. 本文中秩相关系数的置信度在 95% 以下.

表 1 盘的颜色梯度与盘的绝对星等 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值

Table 1 Spearman rank correlation coefficient and statistical value of  $t$ -test between color gradients and absolute magnitudes of disks

	$g-r$	$r-z$	$g-z$
$r_s$	0.110	0.006	0.086
Statistical value of $t$ -test	1.781	0.096	1.292

#### 3.2 盘的颜色梯度与盘的尺度的关系

图 4 是盘的颜色梯度与盘的尺度(用盘的标长  $R_d$  表征盘的尺度)的相关关系示意图. 横坐标是盘在  $r$  波段的标长, 纵坐标从上到下的 3 幅图分别是盘的  $g-r$ 、 $r-z$  和  $g-z$  3 个颜色的梯度. 图中每个数据点代表一个星系, 直线是最佳线性拟合(最小二乘拟合)的结果. 表 2 列出了星系盘的颜色梯度与星系盘尺度的 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值. 表 3 给出了最佳线性拟合的斜率. 从图 4 以及表 2~3 中可以看出, 盘的颜色梯度和盘的尺度有很强的相关关系, 即盘的尺度越大, 盘的颜色梯度就越陡. 而且这种相关性在  $g-z$  波段是最强的, 而在  $g-r$  波段是最弱的, 也就是说对于波长跨度大的颜色来说相关性更强. 从盘形成的物理过程来看, 起决定作用的应该是两个物理量, 即盘的质量 ( $M$ ) 和角动量 ( $J$  或  $\lambda$ ,  $\lambda$  为旋转参量, 是无量纲化的角动量). 这两个物理量与盘的光度  $L_d$  (或绝对星等  $M_d$ ) 和尺度  $R_d$  是密切相关的. 显然  $M \propto L_d$ , 而  $R_d \propto \lambda^{[18]}$ . 而盘的形成过程的差异必然会导致盘上的恒星形成过程的差异, 从而在盘的颜色及颜色梯度上有所反映. 盘的颜色梯度与光度(质量)无关, 说明盘的质量对于盘的增长过程来说并无影响, 不同质量的盘, 其形成和恒星形成都是自相似的过程. 另一方面, 颜色梯度与盘的尺度有关, 越大的盘颜色梯度越陡, 这暗示着角动量的增加会使得盘从里到外的形成或恒星形成时标差异变大.

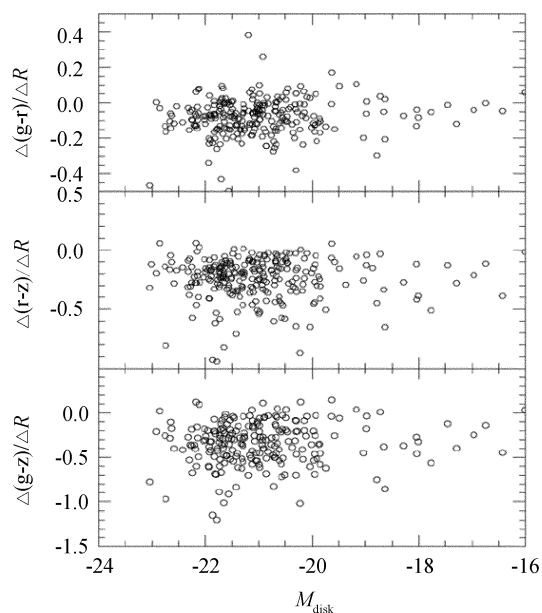


图 3 盘的颜色梯度与盘的绝对星等相关关系示意图  
Fig. 3 Correlations between color gradients and absolute magnitudes of disks

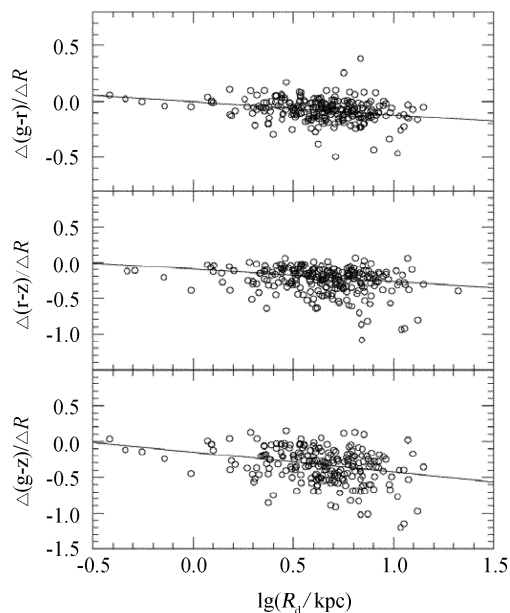


图 4 盘的颜色梯度与盘的尺度相关关系示意图  
Fig. 4 Correlations between color gradients and sizes of disks

表 2 盘的颜色梯度与盘的尺度 Spearman 秩相关系数和 t 检验统计值

Table 2 Spearman rank correlation coefficient and statistical value of t-test between color gradients and sizes of disks

	g-r	r-z	g-z
$r_s$	-0.273	-0.257	-0.320
Statistical value of t-test	4.568	4.255	5.078

表 3 盘的颜色梯度与盘的尺度相关关系最佳线性拟合直线的斜率

Table 3 Slopes of the best linear fittings of the correlation between color gradients and sizes of disks

	Slope
g-r	$-0.117 \pm 0.115$
r-z	$-0.173 \pm 0.186$
g-z	$-0.277 \pm 0.273$

### 3.3 盘的颜色梯度与盘的颜色关系

图 5 是盘的颜色梯度 CGs 与盘的颜色相关关系示意图. 横坐标分别是盘的  $g-r$ 、 $r-z$  和  $g-z$  3 个颜色, 纵坐标分别是与颜色对应的 3 个颜色梯度. 表 4 列出了星系盘的颜色梯度与盘的颜色 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值, 表 5 给出了最佳线性拟合的斜率. 从图 5 以及表 4 ~ 5 中我们可以看出, 盘的颜色梯度与盘的颜色也有较强的相关关系: 盘的颜色越蓝, 其颜色梯度越陡.

表 4 盘的颜色梯度与盘的颜色 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值

Table 4 Spearman rank correlation coefficient and statistical value of  $t$ -test between color gradients and colors of disks

	$g-r$	$r-z$	$g-z$
$r_s$	0.149	0.493	0.389
Statistical value of $t$ -test	2.425	9.072	6.350

表 5 盘的颜色梯度和颜色相关关系最佳线性拟合直线的斜率

Table 5 Slopes of the best linear fittings of the correlation between color gradients and colors of disks

Slope	
$g-r$	$0.162 \pm 0.240$
$r-z$	$0.430 \pm 0.240$
$g-z$	$0.411 \pm 0.239$

### 3.4 盘的颜色梯度与盘的表面亮度的关系

在研究盘的颜色梯度与盘的表面亮度 ( $\mu_d$ ) 关系时, 我们定义盘的表面亮度为从  $R_{50}$  到  $R_{90}$  范围内的平均表面亮度, 而且已经做了  $K$  改正. 这样定义盘的表面亮度能够避免核球的影响. 图 6 是盘的颜色梯度 CGS 与盘的表面亮度相关关系示意图. 横坐标是盘的表面亮度, 纵坐标分别是盘的  $g-r$ 、 $r-z$  和  $g-z$  3 个颜色对应的梯度. 表 6 列出了星系盘的颜色梯度与盘的表面亮度的 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值. 表 7 给出了最佳线性拟合的斜率. 从图 6 以及表 6 ~ 7 中我们可以看出, 盘的颜色梯度与盘的表面亮度也有较强的相关关系: 盘的表面亮度越高, 其颜色梯度越陡.

表 6 盘的颜色梯度与盘的表面亮度 Spearman 秩相关系数和  $t$  检验统计值

Table 6 Spearman rank correlation coefficient and statistical value of  $t$ -test between color gradients and surface brightnesses of disks

	$g-r$	$r-z$	$g-z$
$r_s$	-0.338	-0.447	-0.462
Statistical value of $t$ -test	-5.779	-7.995	-7.831

表 7 盘的颜色梯度与盘的表面亮度相关关系最佳线性拟合直线的斜率

Table 7 Slopes of the best linear fittings of the correlation between color gradients and surface brightnesses of disks

	Slope
g-r	$-0.045 \pm 0.013$
r-z	$-0.148 \pm 0.021$
g-z	$-0.190 \pm 0.030$

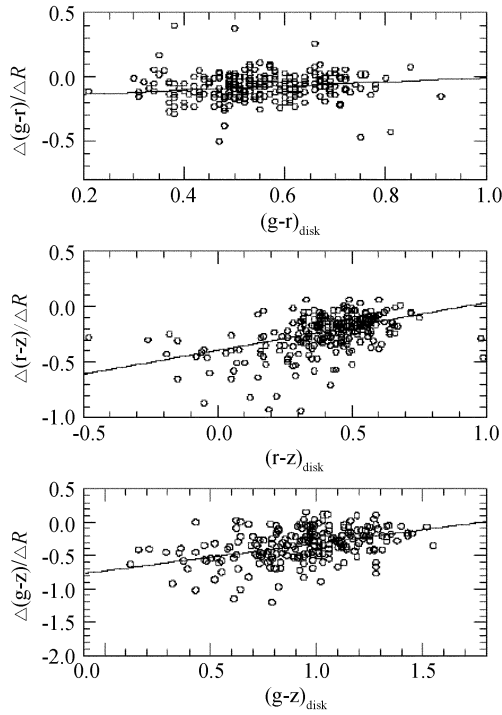


图 5 盘的颜色梯度与盘的颜色相关关系示意图  
Fig. 5 Correlations between color gradients and colors of disks

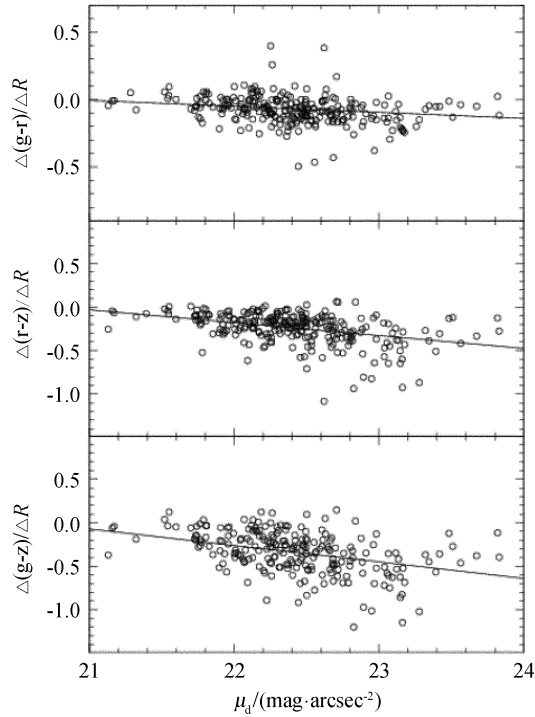


图 6 盘的颜色梯度与盘的表面亮度相关关系示意图  
Fig. 6 Correlations between color gradients and surface brightnesses of disks

## 4 结论与讨论

本文在 SDSS DR2 中选择了 395 个 r 波段亮于 15 等的面向晚型旋涡星系，统计研究了盘的颜色梯度与结构参数的相关关系，结论如下：

- (1) 盘的颜色梯度与盘的绝对星等没有相关性；
- (2) 盘的尺度越大，盘的颜色梯度越陡；

- (3) 盘的颜色越蓝, 盘的颜色梯度越陡;
- (4) 盘的表面亮度越高, 盘的颜色梯度越陡.

统计结果暗示了盘的颜色梯度对盘的形成是很好的观测约束; 之前许多研究工作都发现在盘星系中存在着很强的颜色星等关系 (CMR)<sup>[19-22]</sup>. CMR 表明了绝对星等 (质量) 对盘星系形成过程中的恒星形成历史起着非常重要的作用, 而颜色梯度与绝对星等 (质量) 无关, 也许预示着星系质量对不同区域之间 (如内部和外部) 恒星形成历史的差异影响并不大, 尽管它有可能影响整个星系的总体恒星形成历史, 即不同质量的盘, 其形成和恒星形成都是自相似的过程. 颜色梯度与盘的尺度有关, 越大的盘颜色梯度越陡, 这暗示着角动量的增加会使得盘从里到外的形成或恒星形成时标差异变大. 我们也得到了颜色梯度与颜色的相关性, 越蓝的盘梯度越大. 造成这个关系有两种可能: 一种可能是盘的颜色与盘上恒星的年龄梯度或金属丰度梯度有关; 另一种可能是不同盘上的年龄梯度或金属丰度梯度是一样的, 但是由于在星族演化的早期星族偏蓝, 年龄或金属丰度造成颜色上的差异比晚期的星族更明显, 即梯度更陡. 当然这需要进一步的研究加以区分.

### 参 考 文 献

- [1] Tinsley B M, Larson R B. *ApJ*, 1978, 221: 554
- [2] Kim K O, Ann H B. *JKAS*, 1990, 23: 43
- [3] de Jong R S. *A&A*, 1996, 313: 377
- [4] Cunow B. *MNRAS*, 2004, 353: 477
- [5] Elmegreen D M, Elmegreen B G. *ApJS*, 1984, 54: 127
- [6] Taylor V A, Jansen R A, Windhorst R A, et al. *ApJ*, 2005, 630: 784
- [7] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M, et al. *AJ*, 2002, 123: 485
- [8] Wu H, Shao Z Y, Mo H J, et al. *ApJ*, 2005, 622: 244
- [9] Shao Z Y, Xiao Q B, Shen S Y, et al. *ApJ*, 2007, 659: 1159
- [10] 李化南, 邵正义, 沈世银, 等. *天文学报*, 2009, 50: 21
- [11] Li H N, Shao Z Y, Shen S Y, et al. *ChA&A*, 2009, 33: 256
- [12] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 54
- [13] 李化南, 邵正义, 肖泉宝, 等. *天文学进展*, 2005, 23: 371
- [14] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [15] Blanton M R, Schlegel D J, Strauss M A, et al. *AJ*, 2005, 129: 2562
- [16] 吴梅村. *数理统计学基本原理和方法*. 成都: 西南财经大学出版社, 2006: 247-258
- [17] Liu C Z, Shen S Y, Shao Z Y, et al. *RAA*, 2009, 9: 1119
- [18] Mo H J, Mao S, White S D M. *MNRAS*, 1998, 295: 319
- [19] Baldry I K, Glazebrook K, Brinkmann J, et al. *ApJ*, 2004, 600: 681
- [20] Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A, et al. *ApJ*, 2003, 594: 186
- [21] Chang R X, Shen S Y, Hou J L, et al. *MNRAS*, 2006, 372: 199
- [22] Visvanathan N, Griersmith D. *A&A*, 1977, 59: 317

## Correlations between Color Gradients and Structural Parameters of the Disks in Late-type Spiral Galaxies

LI Hua-nan    ZHENG Xiao-guang

(*College of Physics, Jilin Normal University, Siping 136000*)

**ABSTRACT** From Data Release Two of Sloan Digital Sky Survey (SDSS DR2), 395 late-type spiral galaxies brighter than  $15^m$  in r band are selected. The correlations between the color gradients and other structural parameters of disks are investigated. It is shown that there is no correlation between the color gradients and absolute magnitude (mass); there are strong correlations between the color gradients and sizes of the disks, i.e., the larger the disks, the steeper the color gradients. There are also strong correlations between the color gradients and colors. The bluer the disks, the steeper the color gradients. It is also shown that the color gradients are strongly dependent on the surface brightness of disk. The disk with brighter surface exhibits steeper color gradients. In the end, the constraint of the correlations between the color gradients and other structural parameters of the disks in the late-type spiral galaxies on the star formation history is also discussed.

**Key words** galaxies: spiral, galaxies: fundamental parameters