

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.04.05

侧向星系的氮与硫发射线比研究

豆保帘^{1,2}, 郝 蕾^{1,2}, 尹 君^{1,2}, 林敏仪³

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101)

摘要: 吸积和反馈构成了星系与外界的物质循环, 而金属丰度与循环过程密切相关。通过 MaNGA 积分视场巡天得到的 608 个侧向星系样本, 可用以研究 N 与 S 发射线比以及侧向星系金属丰度分布情况。研究表明, MaNGA 侧向星系样本与 SDSS 星系在 N2S2 图上会呈现相似的双峰分布, 且侧向星系略微往左上方偏移。此外, 大部分侧向星系中心的 [N II]/[S II] 比外围的高, 4 个星系中心呈现 N 增丰的双锥状结构。最后, 由不同方法测量的侧向星系金属丰度空间分布基本一致, 个别星系的 O 丰度外围比中心高; 这可能与 R23 “双分支” 选择判据有关, 需要进一步优化。

关键词: 物质循环; 金属丰度; N2S2 图

中图分类号: P142.3 **文献标识码:** A

1 引 言

星系中的物质循环, 包括气体的内流吸积和外流反馈, 是支撑星系形成和演化的核心物理过程之一, 星系气体中的金属含量也随着这个循环过程不断改变。星系中的金属丰度可以表明星系的演化阶段。随着星系的不断演化, 宇宙的金属丰度不断增加, 恒星形成星系中的金属含量是星系中的恒星形成、流入和流出星系的气体之间复杂相互作用的结果。影响星系中金属丰度变化的关键过程是气体流出 (由超新星或其他过程驱动) 以及由星系际介质流入。

这种循环过程更容易在侧向星系中观测到 (如图 1 所示)。倾角接近 90° , 盘面与视线方向几乎平行的盘状星系通常被称为侧向星系, 是唯一可以直接研究其垂直结构的河外天体。侧向星系的核球的光与星系盘可以整合到一个平面中, 核球与盘的尺寸相差明显, 传统上研究侧向系统中盘的径向结构也更容易。在侧向星系的盘、核球和晕内物质的垂直分布研究中, 天文学家取得了许多重要的结果, 也包括一些关于外流特性以及盘外弥散电离气体分布的研究。外流中有无金属以及外流对侧向星系金属丰度分布的影响, 也是值得研究的课题, 如 Chisholm 等人^[2]研究了外流与金属增丰之间的关联。

收稿日期: 2024-10-28; 修回日期: 2024-12-24

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0503402); 国家自然科学基金 (12233005)

通讯作者: 郝蕾, haol@shao.ac.cn

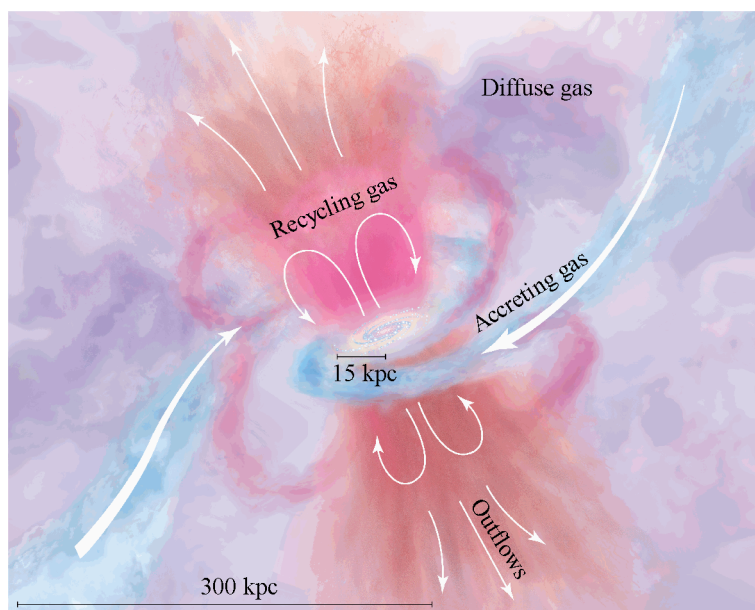


图 1 星系与外界的气体循环示意图^[1]

星系中的气体电离后会产生发射线, 通过研究这些发射线, 我们可以确定电离参数的属性, 该属性与某种元素处于不同离子状态的程度有关 (即气体单电离与双电离的程度)。氢原子在可见光的光谱中有两条最强的发射线: $H\alpha$ $\lambda 6563 \text{ \AA}$ 和 $H\beta$ $\lambda 4861 \text{ \AA}$, 这些谱线是在电离氢原子中缺失的电子重新结合并从较高能级跃迁到较低能级时产生的。此外, 金属元素的电离态也具有一些显著的特征, 金属离子与电子碰撞使离子进入激发态, 随后退激发回到基态会发射光子, 从而产生特征谱线。常见的禁线包括单电离 O 双线 $[O \text{ II}]$ $\lambda 3726, 3729 \text{ \AA}$ 、双电离 O 双线 $[O \text{ III}]$ $\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$ 、单电离 N 双线 $[N \text{ II}]$ $\lambda 6548, 6584 \text{ \AA}$ 、单电离 S 双线 $[S \text{ II}]$ $\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$ 。这些不同发射线的组合能够揭示恒星形成区的性质, 例如气体的密度和金属丰度。

$[N \text{ II}]$ 和 $[S \text{ II}]$ 是直接的观测量, 作为金属丰度的指针有一定的局限性, 但其相对关系却对星系的金属含量有一定的指示作用。考虑到不同金属丰度测量方法之间有很大的系统误差, 因此直接使用发射线的比值来研究星系中金属的特征有一定的意义。特别是 $[N \text{ II}]$ 和 $[S \text{ II}]$ 的波长相近, 其比值受尘埃消光的影响较小。因此在本文中我们详细研究了 $[N \text{ II}]$ $\lambda 6584 \text{ \AA}$ 与 $[S \text{ II}]$ $\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$ 这两个发射线的比较, 特别是使用了由 $[N \text{ II}]$ 和 $[S \text{ II}]$ 演变而来的 N2S2 诊断图 (即 $\lg(H\alpha/[S \text{ II}]) - \lg(H\alpha/[N \text{ II}])$)。通过对侧向星系的研究能够了解金属的分布情况, 推动我们对星系物质循环的研究。

根据目前对恒星核合成的了解, 我们可以将核合成产物分为两类: 初级元素和次级元素。初级元素 (例如 C 和 O) 的产量与恒星的初始金属丰度无关, 而次级元素的产量取决于恒星中重元素的初始丰度。N 既可以作为初级元素, 也可以作为次级元素。如果星际介质中具有相对较高丰度的金属元素来自之前恒星形成的重元素, 那么 N 由次级元素主导, 因为

它的产生是基于恒星形成之前产生的 C 和 O。次级 N 的产生来源于所有质量的恒星，并依赖于丰度，所以可预见 N/O（或 N/ α 元素）在高金属丰度下会随着金属丰度的增加而增加。Pérez 等人^[3]研究发现，N 丰度随 O 丰度的二次方演化即 $N/H \propto (O/H)^2$ ，而 Dopita 等人^[4]研究了 N/O 和金属丰度之间的相关关系，因此，N 与 α 元素丰度比（N/ α ，例如 N/O 和 N/S 等）常被用作金属丰度的探针，如表 1 所示。然而，这些探针也有局限性，例如对金属丰度的依赖是间接的。当系统偏离 N/ α -O/H 平均关系时，这些探针可能具有欺骗性，并且在低金属丰度下 N/ α -O/H 变平，两者都无法成为敏感的金属丰度探针。

星系的金属丰度可以通过多种方式测定，总体而言分为两种，即基于电子温度的直接测量法和利用强发射线比值的经验方法。直接测量法又称“ T_e 方法”，该方法是通过测量较高激发线 [O III] $\lambda 4363 \text{ \AA}$ 与较低激发线 [O III] $\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$ 之间的比值，来估计气体的电子温度，再结合电子密度计算出电离平衡时各离子的丰度。这种方法会受到金属丰度的严重影响，只有在极贫金属的环境中才能观测到 [O III] $\lambda 4363 \text{ \AA}$ ，但其信号非常微弱，在较高金属丰度下无法观测到。对于富金属星系，常用强发射线的比值来估算恒星形成区的金属丰度，常用的强发射线校准包括 R23、N2、N2O2 和 O3N2 等，Kewley 和 Ellison^[5]详细研究了这些金属丰度探针与 O 元素丰度之间的定标关系。

表 1 不同金属丰度探针的对比

名称	定义	优点	不足之处
N2	$\lg([N \text{ II}]/H\alpha)$	不受尘埃红化影响	强烈依赖 N/H
S2	$\lg([S \text{ II}]/H\alpha)$	不受尘埃红化影响	强烈依赖电离参数 U
N2O2	$\lg([N \text{ II}]/[O \text{ II}])$	受电离参数 U 影响较小	需要校正尘埃红化
N2S2	$\lg([N \text{ II}]/[S \text{ II}])$	受到尘埃红化影响较小	低金属丰度不敏感
O3N2	$\lg([O \text{ III}]/H\beta) - \lg([N \text{ II}]/H\alpha)$	不受尘埃红化影响	强烈依赖电离参数 U 和 N/O
R23	$\lg([O \text{ II}] + [O \text{ III}])/H\beta)$	考虑 O 的两个离子相	次要依赖电离参数 U、双值

随着积分场光谱学（IFS）的发展，我们可以获得所观测星系中每个位置的光谱，积分视场单元（IFU）数据提供了大量关于星系性质的经验解释和约束。借助大型积分场光谱巡天（例如 CALIFA、SAMI 和 MaNGA）数据，许多人系统地研究了金属丰度的空间特性，比较集中的研究包括金属丰度梯度关系以及星系间相互作用、局部金属丰度与面密度之间的关联、星系的内流、外流等^[6]。

鉴于 IFU 能够获取空间分辨的二维光谱的优点，我们可以借此来探究星系内部甚至外部的金属分布。本论文的主要研究内容就是挑选一个大的侧向星系样本，并通过其二维光谱研究这些星系中的 N 与 S 发射线比的相关特性及其在侧向星系中的分布。因此，我们从 MaNGA 积分视场巡天数据中挑选出 608 个侧向星系，并研究了它们在 N2S2 图中的分布及其所反映的金属丰度分布。本文的结构如下：第 2 章介绍 MaNGA 积分视场巡天以及侧向星系样本的选取过程；第 3 章介绍 SDSS 星系和 MaNGA 侧向星系样本在 N2S2 图的分布、 $[N \text{ II}]/[S \text{ II}]$ 的特征，以及侧向星系金属丰度的分布；第 4 章是对本文的总结与展望。

2 数据和样本

在本文中我们使用了 SDSS 星系样本, 以及构建了一个包含 608 个侧向星系的 MaNGA 星系样本。首先, 通过 MPA-JHU DR8 星表构建了一个包含约 170 000 个星系的 SDSS 大样本星系, MPA-JHU 星表提供了一些额外的星系属性, 例如星系的电离状态分类 (BPT 诊断图)、星系的恒星质量 (M_*)、恒星形成率 (SFR) 以及气相金属丰度等。

在构建 SDSS 样本的过程中, 为了确保发射线的可用性, 我们要求所有的强发射线 ($H\alpha$ 、 $[O III]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 、 $H\beta$ 、 $[N II]\lambda 6584 \text{ \AA}$ 和 $[S II]\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$) 的信噪比大于 5, 对于缺乏发射线或发射线非常弱的星系均未采用。随后我们将这些星系按照 BPT 图^[7]进行分类, 将星系分为恒星形成星系、复合星系和 AGN, AGN 又分成 Seyfert 和 LINER。恒星形成星系、复合星系、Seyfert 星系和 LINER 星系的比例分别为 73.69%、14.73%、8.56% 和 3.02%。

2.1 MaNGA 积分视场巡天简介

MaNGA 是 SDSS-IV 中的巡天项目, 使用积分视场单元观测来生成空间分辨的光谱数据, MaNGA 的目标是获得红移范围 0.01 ~ 0.15 内约 10 000 个星系的最终 IFS 样本^[8]。巡天在 2.5 m Apache Point 天文台进行, 从 2015 年 7 月到 2020 年 8 月, MaNGA 项目成功观测到了 10 010 个近邻星系的 IFS 光谱, 每个 plate 上使用了 17 个 IFU, 每个 IFU 包含 19~127 根光纤, IFU 的形状为六边形, 以优化探测器上的可用空间; 每个 Spaxel 的空间分辨率为 $2''$, 在 z 约 0.05 处对应的物理距离约为 2 kpc。IFU 位于 BOSS 摄谱仪上, 其色散中值为 $\sigma_{\text{inst}} \approx 72 \text{ km/s}$ 。除此之外, 在 plate 上还有一组 12 个光纤束, 每束包含 7 根光纤, 用于流量校准, 另外 96 根光纤用来获取背景天空光谱。覆盖 3 622 ~ 10 350 \AA 的整个可见光谱, 光谱分辨率 $R \approx 1\,100 \sim 2\,200$ 。

MaNGA 巡天的目标源选自 NASA-Sloan Atlas (NSA) 星表, 该星表是由 Blanton 等人^[9]构建的包含约 640 000 个低红移星系的星表, 数据基于 SDSS、GALEX 和 2MASS。MaNGA 完整样本包括主样本、次样本和颜色增强样本。主样本和次样本的比例为 3:1, 对于主样本星系, MaNGA 的目标是获得至少 $1.5R_e$ 的径向覆盖范围, 次样本星系的覆盖范围至少为 $2.5R_e$, 典型的 MaNGA 星系有效半径覆盖到 15 kpc。颜色增强样本还进一步选择了 $NUV-r$ 与 M_i 图中主样本未很好采样的星系, 例如覆盖低质量的红色星系和高质量的蓝色星系, 没有对颜色、形态或环境进行任何切割, 因此观测到的星系完全代表了当地的星系群。总体而言, MaNGA 目标覆盖的恒星质量范围为 $10^9 \sim 6 \times 10^{11.5} M_\odot$, 红移范围为 0.01 ~ 0.15, 中值红移为 $z \approx 0.03$, 次级样本星系通常具有较高的红移 ($\bar{z} \approx 0.045$)。红移限制保证了恒星质量具有大致平坦的数密度分布。

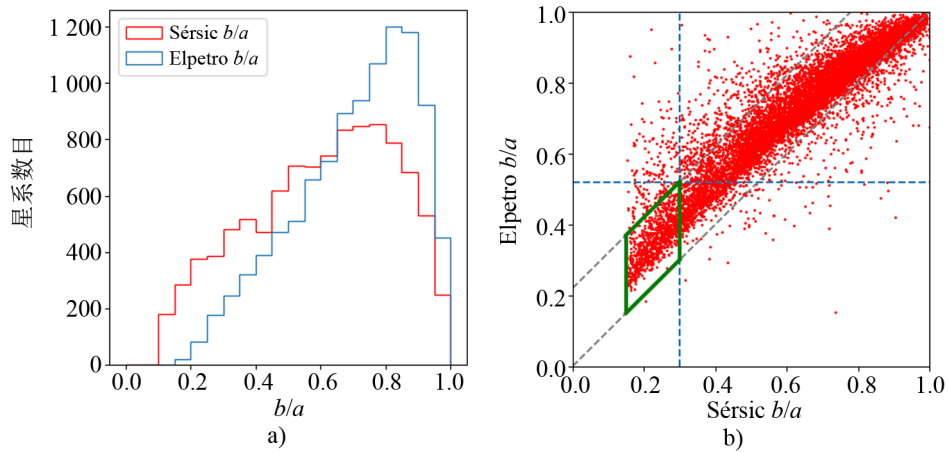
MaNGA 原始光谱数据使用数据处理程序 DRP (Data Reduction Pipeline) 进行处理^[10], 为每个星系生成一个数据立方体, 其尺寸为 $0.5'' \times 0.5''$ 。DRP 输出的数据立方体由数据分析程序 DAP (Data Analysis Pipeline) 进行分析, DAP 的主要输出是发射线流量、恒星运动学参数以及连续谱指数。DAP 还创建了测量的发射线强度和光谱指数的二维图, 以及测量量, 例如一个有效半径 R_e 内的 $H\alpha$ 流量, 使用 Schlegel 等人^[11]的 $E(B-V)$ 值对所有 MaNGA 的空间像素进行前景消光改正, 并假设银河系消光曲线 $R_V = 3.1$ 。

最终 MaNGA MPL-11 发布的数据包含 11 273 个数据立方体, 属于 SDSS DR17 的一部分。在这些数据立方体中, 包含一些后发座 (Coma)、IC342、M31 和球状星团等, 在扣除了重复观测的目标源之后, 共有 10 010 个不同的星系。

2.2 MaNGA 侧向星系样本

我们判定侧向星系的主要依据是星系的倾斜角度, 即星系沿视线方向的轴比, 通常用 b/a 来表示, 其中 b 为星系的短轴, a 为长轴。正向星系的 b/a 为 1, 侧向星系的 b/a 则为 0。我们从 MaNGA MPL-11 的 10 010 个星系中, 通过查找它们在 MaNGA DRPall 星表中所记录的 b/a 值来挑选侧向星系。在 DRPall 星表中, 每个星系有两个 b/a 参数, 分别为 $b/a_{\text{Sérsic}}$ 和 b/a_{Elpetro} , 其中 $b/a_{\text{Sérsic}}$ 表示对星系进行二维单成分 Sérsic 拟合后获得的轴比, b/a_{Elpetro} 是来自 r 波段图像椭圆 Petrosian 分析的轴比, 两个数值略有不同。由于观测的限制, $b/a_{\text{Sérsic}}$ 更能代表实际的倾角, 参考文献 [12, 13] 中选择侧向星系的方法是 $b/a_{\text{Sérsic}} < 0.3$, 并结合 b/a_{Elpetro} 来确定侧向星系。

首先, 我们画出了两个 b/a 的分布直方图和线性关系, 由图 2a) 得到 $b/a_{\text{Sérsic}}$ 的中值在 0.59 附近, 而 b/a_{Elpetro} 的中值在 0.71 附近; 并且从图 2b) 可以看出, 大多数星系的 b/a_{Elpetro} 要高出 $b/a_{\text{Sérsic}}$ 约 0.2, 偏离在分界线的一侧。为此我们结合两个参数, 选取两个 b/a 值都比较小的区域, 在 $b/a_{\text{Sérsic}} < 0.3$ 的同时要求 $b/a_{\text{Elpetro}} < 0.52$, 即图 2b) 中平行四边形之内的区域, $0.15 < b/a_{\text{Sérsic}} < 0.3$ 以及 $b/a_{\text{Sérsic}} < b/a_{\text{Elpetro}} < b/a_{\text{Sérsic}} + 0.22$, 该区域共有 852 个星系。随后我们将这些数据与 NSA 星表匹配, 有 7 个星系为同一个目标源分别用不同的 plate 观测两次, 我们选取了视场较大的星系, 最终得到 845 个星系。随后我们又逐一比对了 SDSS 图像, 从图像上排除存在并合、其他源污染或视场太小的星系, 一共去除了 27 个星系。



注: b) 中红色的点为 MaNGA 所有星系, 绿色平行四边形内的点为侧向星系。

图 2 b/a 的分布直方图以及侧向星系的选择范围

我们使用的发射线流量来自 DAP 文件中的 “EMLINE_GFLUX”, 通过连续谱加发射线拟合得到高斯轮廓积分流量。发射线流量考虑了银河系消光, 并假设 O’Donnell94 消光函

数; 对于侧向星系内部尘埃引起的消光, 我们使用 Calzetti 等人^[14]提出的星爆星系模型的消光曲线 $R_V = A_V/E(B-V) = 4.05 \pm 0.80$, 其中 A_V 为 V 波段的消光。假设温度为 $T = 10^4$ K, 电子数密度为 $n_e = 10^2 \text{ cm}^3$ (Case B), 此时 $H\alpha/H\beta$ 本征流量比为 $2.86^{[15]}$, 使用 Calzetti00 消光曲线, 可以计算出色余 $E(B-V)$:

$$E(B-V) = 1.97 \lg \left[\frac{(H\alpha/H\beta)_{\text{obs}}}{2.86} \right]. \quad (1)$$

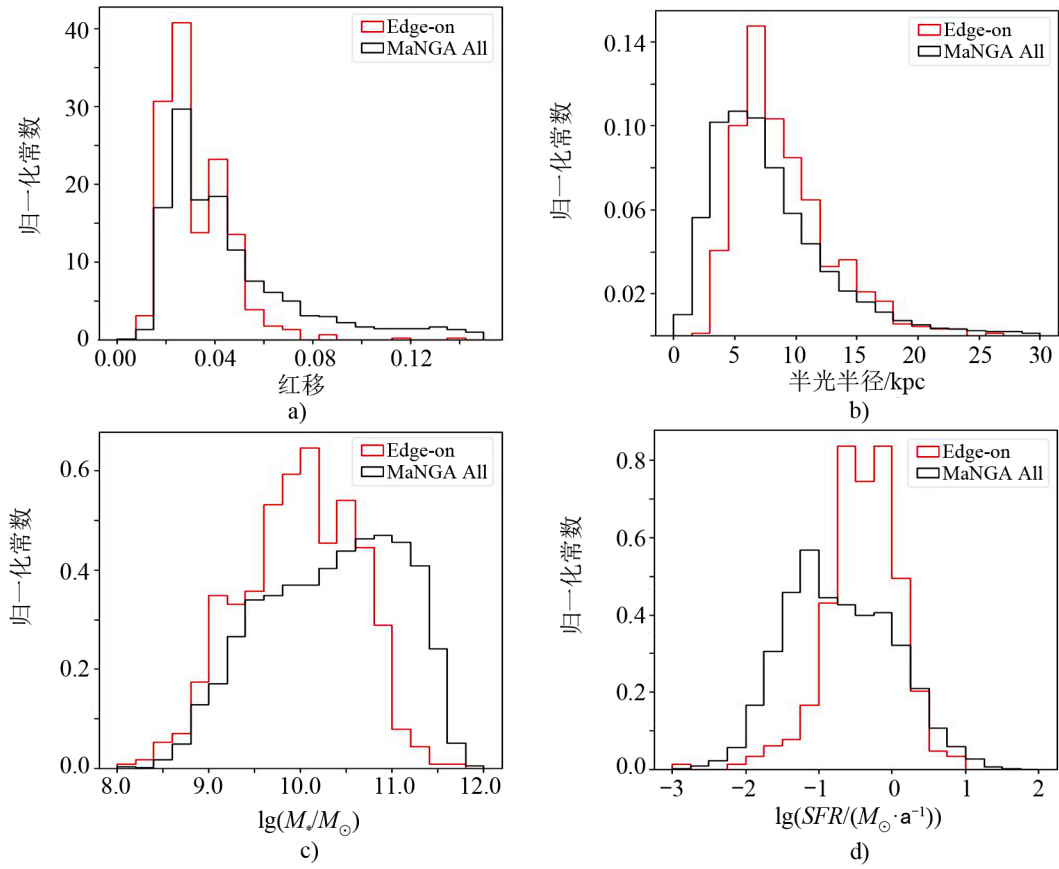
随后由消光 $A_\lambda = k(\lambda)E(B-V)$ 可以得到波长 λ 处的本征流量与观测流量之间的关系, 其表示为:

$$F_{\text{int}}(\lambda) = F_{\text{obs}}(\lambda)10^{0.4A_\lambda} = F_{\text{obs}}(\lambda)10^{0.4k(\lambda)E(B-V)}. \quad (2)$$

接下来, 我们考虑了这些星系在 MaNGA 光谱中的发射线信噪比, 要求每个 Spaxel 的 $H\alpha$ 、 $[O \text{ III}] \lambda 5007 \text{ \AA}$ 、 $H\beta$ 、 $[N \text{ II}] \lambda 6584 \text{ \AA}$ 和 $[S \text{ II}] \lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$ 信噪比均大于 3, 信噪比可以通过 DAP 中每条发射线流量乘以逆方差的平方根来获得。我们剔除了信噪比小于 3, 以及任何其他缺乏掩模、测量不可靠或在 MaNGA 星表中被认为无法用于科学研究的 Spaxel。同时我们还考虑了每个 Spaxel 的平均连续谱信噪比, 对波长范围 $3\,700 \sim 9\,000 \text{ \AA}$ 内的每个观测波长处的信噪比取一个平均值, 当平均信噪比大于 10 时, 该 Spaxel 被认为是有效的。我们要求每个星系至少有 100 个有效 Spaxel, 其中有 689 个星系符合此要求。最后我们又对所有 Spaxel 按照 BPT 图分类, 排除了中心区域 $0.5R_e$ 范围内超过 10 个 AGN Spaxel (在 BPT 图 $([N \text{ II}]/H\alpha - [O \text{ III}]/H\beta)$ 中位于 Ke01 分界线以上, 包括 Seyfert 和 LINER) 的星系, 最终得到一个包含 608 个星系的侧向星系样本。

之后我们绘制了 608 个侧向星系样本的红移、半光半径 ($R50$)、恒星质量和恒星形成率 (SFR), 并与 MaNGA 总星系样本进行了对比。其中, 红移来自 NSA 星表中的 “NSA_Z”; $R50$ 来自 DRPAll 星表中的 “NSA_SERSIC_TH50”, 表示 r 波段的二维单组分 Sérsic 拟合的 50% 总光度对应的半径; 恒星质量和恒星形成率来自 MPA-JHU 星表: 恒星质量 (标记为 LGM_TOT_P50) 是根据星族的理论模型计算得到, 并假设为 Kroupa IMF^[16]; SFR (标记为 SFR_TOT_P50) 是使用 $H\alpha$ 发射线光度 (当可用时) 估计的, $SFR(M_\odot \cdot \text{a}^{-1}) = 8 \times 10^{-49} L(H\alpha) (\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$, 对于无发射线的星系, 恒星形成率是使用恒星形成率与光谱指数 D4000 之间的关系而得出。实际上, 并非所有的 MaNGA 星系都能在 MPA-JHU 星表中找到对应星系, 我们仅获取到 577 个星系的恒星质量以及恒星形成率。

图 3 a) 和 b) 分别表示红移和半光半径的直方图, 从图 3a) 中可以看出, 绝大多数侧向星系的红移都处在 $0.01 \sim 0.09$ 之间, 中值红移为 0.029, 比较接近 MaNGA 总星系样本的中值红移 0.03。星系的半光半径 $R50$ 分布如图 3b) 所示, $R50$ 的中值与 MaNGA 总星系也比较接近, $R50$ 大于 15 kpc 的大星系的数量不多。图 3c) 和 d) 分别表示恒星质量和恒星形成率的直方图, 该样本的恒星质量覆盖范围集中在 $10^9 \sim 10^{11} M_\odot$, 中值为 $10^{10} M_\odot$; 恒星形成率的范围集中在 $0.1 \sim 2 M_\odot/\text{a}$, 中值为 $0.43 M_\odot/\text{a}$ 。



注：a)、b)、c) 和 d) 的横坐标分别为红移、半光半径、恒星质量和恒星形成率，纵坐标为归一化常数。红色表示侧向星系样本，黑色表示 MaNGA 总星系样本。

图 3 红移、半径、恒星质量和恒星形成率分布直方图

3 结果与讨论

在本章第 1 节我们会讨论 SDSS 星系与 MaNGA 侧向星系在 N2S2 图上的分布，第 2 节讨论 MaNGA 侧向星系 [N II]/[S II] 的空间分布，第 3 节讨论 MaNGA 侧向星系金属丰度分布情况。

3.1 SDSS 星系和 MaNGA 侧向星系在 N2S2 图上的分布

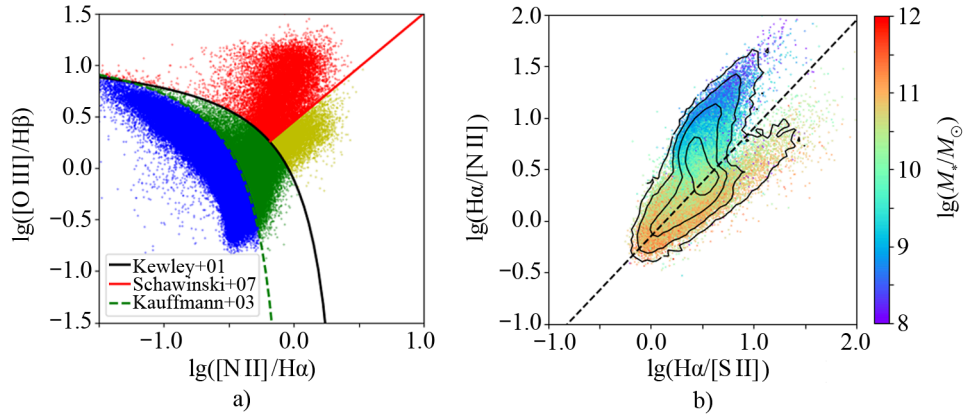
正如引言中介绍的，N 元素具有初级和次级元素两种来源，与 α 族元素之间的比值对星系的金属循环和演化有重要的指示作用，而 S 正是 α 族元素之一。因此，N2S2 诊断图 ($\lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}]) - \lg(\text{H}\alpha/[\text{N II}])$) 以及 [N II]/[S II] 发射线比值应该也具有指示作用。

N2S2 诊断图是 Sabbadin^[17] 针对银河系内的行星状星云、超新星遗迹等目标源的区分而提出的。但 [N II] 和 [S II] 发射线本身对星系中的金属丰度有很强的指示作用，因此这一诊断图应该也包含了金属丰度的信息。Delgado 等人^[18] 首次引入 N2S2 用于河外 H II 区的金属

丰度和电离状态的诊断, 此后, 一些天文学家^[19,20]持续发展了该方法。不过此前的工作都只是利用这一诊断图对星系整体金属丰度做诊断。

3.1.1 SDSS 星系在 N2S2 图上的分布

首先, 我们探究了 SDSS 星系在 N2S2 图上的分布情况。我们对 SDSS 星系进行了 BPT 图分类, 如图 4a) 所示, 依据 BPT 诊断图, 星系可以被分为恒星形成星系、复合星系、LINER 和 Seyfert。我们分别将恒星形成星系、复合星系、Seyfert 和 LINER 画在 N2S2 图上, 发现只有 Seyfert 对结果影响最大; 因此我们忽略了 Seyfert, 并把其余星系都画在 N2S2 图上, 发现这些星系呈现双峰分布。我们定义双峰分界线: $\lg(\text{H}\alpha/[\text{N II}]) = 1.05 \times \lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}]) - 0.15$, 如图 4b) 中虚线所示。这一分界线将 SDSS 大样本星系分成两类, 处于分界线右下方区域的表示 [N II] 相对于 [S II] 较高的星系, 左上方区域则表示 [N II] 相对于 [S II] 较低的星系。考虑到 N 元素有初级 N 和次级 N 两种起源, 我们推测 N2S2 图中靠下一支的出现有可能是次级 N 起源开始主导 N 丰度的一个直观体现。



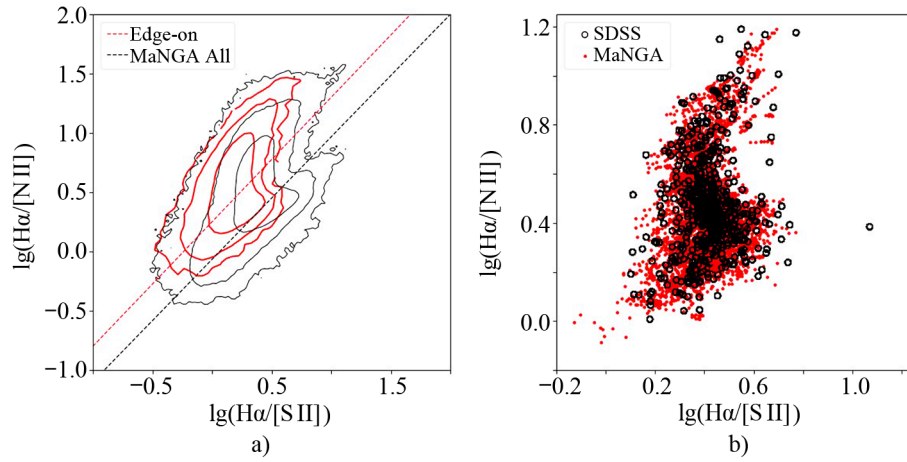
注: a) 中蓝点表示恒星形成星系, 绿点表示复合星系, 红点表示“Seyfert”, 黄点表示“LINER”。b) 中等值线为每个 bin 中 SDSS 星系数目的对数值相等连成的线 (分成 50×50 个 bin), 右侧颜色棒表示星系的恒星质量 $\lg(M_*/M_\odot)$ 。

图 4 SDSS 大样本星系的 BPT 分类图以及 N2S2 图

随后我们考虑了双峰分布与恒星质量的关系, 以进一步证明上述推测。图 4b) 中星系的颜色由星系的恒星质量来标注。我们发现, 处于上支 ([N II] 相对于 [S II] 较低) 的星系的恒星质量较小, 而处于下支的星系的恒星质量较大。双支分界之处的星系恒星质量大约为 $10^{10} M_\odot$, 而这一质量恰恰是次级 N 开始主导 N 丰度的恒星质量^[21]。

3.1.2 MaNGA 侧向星系在 N2S2 图上的分布

SDSS 星系光谱只是考察了星系中心的性质, 无法提供星系不同位置的信息。利用空间分辨的侧向星系样本, 我们想知道是否也可以在 N2S2 图中观察到可能直观表征 N 丰度性质的双峰分布? 为此, 我们对空间分辨的 MaNGA 侧向星系不同位置上的光谱进行了考察。图 5a) 展示了我们选择的 608 个 MaNGA 侧向星系所有可用光谱的等值图, 我们发现侧向星系在 N2S2 图上也能看出双峰分布, 尽管 [N II] 相对于 [S II] 较高这一支不是很突出。



注: a) 黑色等值线为 MaNGA 总星系的 Spaxel 数目的对数值相等连成的线, 红色等值线为侧向星系的 Spaxel 数目的对数值相等连成的线, 黑色虚线为 MaNGA 总星系的分界线, 红色虚线为 MaNGA 侧向星系的分界线。b) 红色的点表示 MaNGA 星系中心 $3''$ 内的光谱, 黑色空心圆为 SDSS 星系的光谱。

图 5 MaNGA 侧向星系的分界线以及与 SDSS 光谱的对比

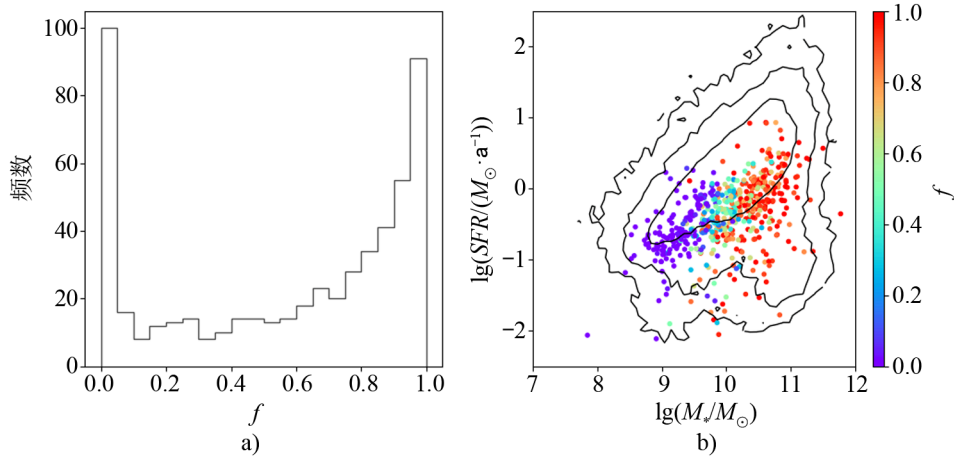
出乎我们的意料, 侧向星系样本的双峰分布相较于 SDSS 星系的分布显著不同。由于 MaNGA 光谱反映的是星系整体结果, 而 SDSS 光谱得到的仅是中心区域的结果, 二者并不具备直接可比性, 因此我们使用 MaNGA 总星系样本的谱线比作为参考。如图 5a) 所示, MaNGA 总星系样本的分界线比较接近 3.1.1 小节定义的 SDSS 星系的分界线, 而侧向星系相较于 MaNGA 总星系样本更集中在分界线的左上方区域, 侧向星系中处于分界线以下的只占少数。事实上, 如果我们将 SDSS 星系的分界线向上移动 0.3 dex, 则可以更好地捕捉侧向星系在 N2S2 图上的双峰分布, 由此定义侧向星系双峰分界线: $\lg(\text{H}\alpha/[\text{N II}]) = 1.05 \times \lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}]) + 0.15$ 。不仅如此, $\lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}])$ 的范围也有所减小, SDSS 大样本星系的 $\lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}])$ 集中在 $-0.2 \sim 1.3$, 而侧向星系的集中在 $-0.2 \sim 0.8$ 。

为了进一步检查该结果是否来自测量方法的系统偏差, 通过将侧向星系样本的 (RA, DEC, z) 与 MPA-JHU 星表逐一进行匹配, 我们得到相对应的 SDSS 侧向星系, 然后进一步对比了 SDSS 星系单光纤光谱与 MaNGA 星系中心 $3''$ 范围的光谱, 并画出了它们在 N2S2 图上的分布。由图 5b) 可知, MaNGA 星系中心的光谱与 SDSS 星系的光谱基本重合。

尽管仔细检查了每个星系, 我们确实可以发现中心的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 一般比外围要高, 但这种分界线的上移却让人困惑。这可能暗示着金属丰度的一些具体性质与 ISM 在星系上的具体位置有关: 大质量星系的外围和小质量星系的中心, 即使它们的质量面密度相当, 在 N2S2 图上的分布也是不同的。而这样对位置的敏感性可能正是金属丰度与星系外流、吸积等过程敏感的一种反映, 因为这些过程都与气体在星系中的位置有关。对这一问题的更进一步理解还需要更多深入的探究。

接下来, 我们将对 MaNGA 星系在 N2S2 图上的分布做些简单的统计分析。我们发现有些星系在 N2S2 图上完全分布在双峰的一侧, 而有些星系横跨双峰的分界线。为了统计每个

星系中双峰的分布, 我们定义变量 Spaxel 数目比 f , 具体为处在 MaNGA 样本双峰分界线以下的 Spaxel 数目除以该星系中总的 Spaxel 数目。 f 越大, 表示该星系中拥有高 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 的 Spaxel 数目越多。 我们发现在 608 个星系中, 有 52 个和 10 个星系的 f 分别为 0 和 1, 即这些星系中全部的 Spaxel 都在双峰分布的一侧, 剩下星系的 f 分布如图 6a) 所示。



注: b) 中的等值线为 SDSS 星系数目的对数值相等连成的线。

图 6 f 的分布直方图与 MaNGA 侧向星系在质量-恒星形成率关系图上的分布

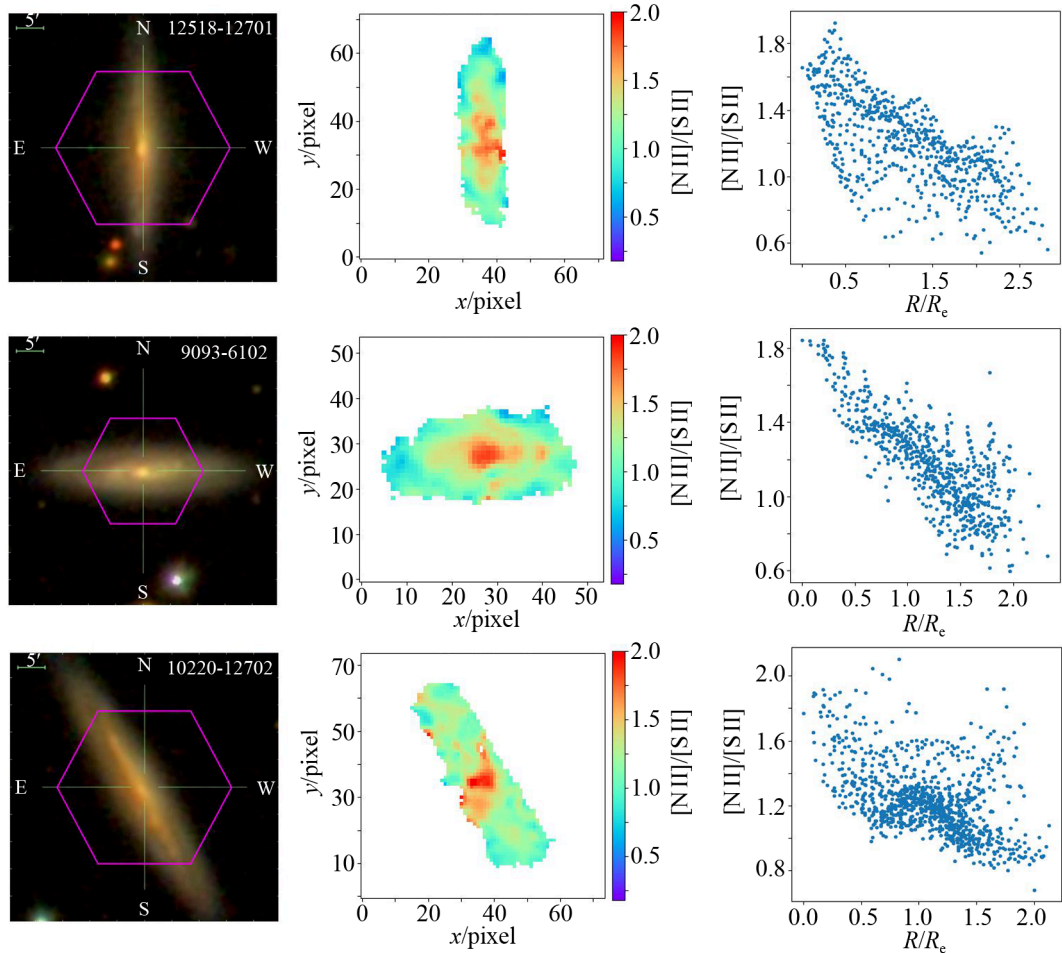
图 6b) 中, 我们在恒星质量-恒星形成率基本关系图上展示了 608 个侧向星系的分布, 并以 f 数值对应图上点的颜色。等值图来自 SDSS 星系, 它展示了两个分支: 靠上的是恒星形成星系, 而靠下的是被“熄灭”的星系。我们发现, 大部分 MaNGA 侧向星系集中在恒星形成星系分支靠下的部分, 相比于 SDSS 星系中的恒星形成星系而言, 更集中在向“熄灭”分支过渡的区域, 这可能是因为这些星系中的消光对恒星形成率的估计造成了影响。还有一部分 MaNGA 侧向星系位于恒星形成“熄灭”的分支。

3.2 MaNGA 侧向星系 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 的空间分布

上一节我们研究了 N2S2 诊断图的性质, 本质上也可由 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 这两条发射线的比值直接来表征。特别是, 采用发射线比值 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$, 我们可以研究侧向星系中此值的空间分布情况, 这对理解金属丰度的性质是有意义的。我们考察了 608 个侧向星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 分布图以及 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 与距星系中心的距离 R/R_e 的关系图, 发现绝大多数星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 值在星系中心明显更高, 并且 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 的增加有单调下降的趋势; 但也有 20 个星系例外, 这些星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 没有明显地随 R/R_e 增加而下降。

在图 7 中, 我们随机选取了几个星系作为示例, 分别展示了宽波段图像、 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 空间分布图和 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 变化的分布图, 可以看到 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 的空间分布图展示了比宽波段图像更丰富的信息。有多个星系 (如 9093-6102) 在 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 图像中能清晰地看到从盘延伸出去的气体, 这些延展气体的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 值相对来说都比较高, 而且从宽波段图像中完全看不到这些延展气体的痕迹。这样的延展气体很可能反映了星系中气体的外流,

而且这样的外流还伴随着金属增丰的过程 ($[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 的比值较高)。



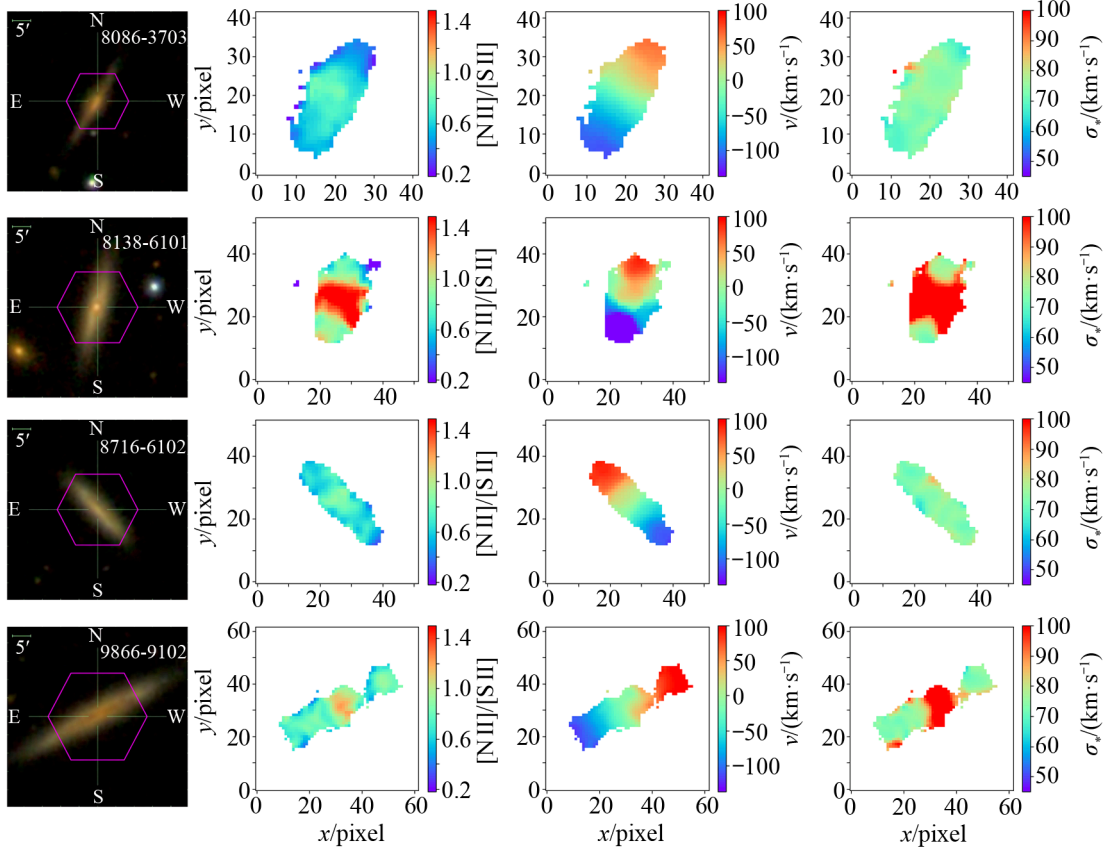
注：第 1 列是星系的宽波段图像，第 2 列是星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 空间分布图，第 3 列是 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 变化的分布图。

图 7 星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 空间分布与 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 变化示例

通常来说，星系的外流还有一个常见的特征是呈现双锥状结构。因此，我们目视查看了所有 608 个星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 图像，发现有 4 个星系中心的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 从形态上呈现一个类似双锥的结构，即垂直于盘面的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 发射线比值比盘上 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 发射线比值明显要高。

图 8 展示了这几个星系的图像、 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 分布以及速度分布情况，我们使用了 $\text{H}\alpha$ 发射线的视向速度以及高斯拟合的速度弥散。通常规则盘星系的速度场一边是红，一边是蓝，如果从红到蓝存在扭曲，多半是有内流或外流的迹象^[22]，而这些地方的速度弥散也会增加。从运动学信息来看，图 8 中第 2 个星系（8318-6101）的速度弥散中间明显较高，第 4 个星

系 (9866-9102) 的速度场中间可以看出扭曲, 速度为正表示远离视线方向, 中间偏红的则表明有向外流出的气体, 反之则是有内流。

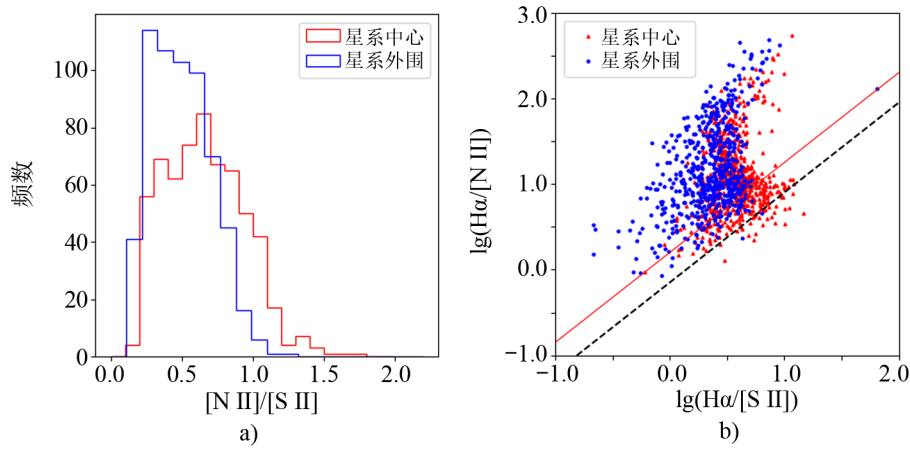


注: 第 1 列是星系的宽波段图像, 第 2 列是星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 空间分布图, 第 3 列是速度场的分布图, 第 4 列是速度弥散图。

图 8 双锥状结构的星系示例

由于 MaNGA 观测的曝光时长有限, 盘外区域的光谱观测信噪比通常不高, 因此这样的挑选只能是尝试性的。在垂直于盘面方向的气体呈现出显著的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 增丰, 该现象可能也暗示这些星系受到较明显的外流影响。

MaNGA 侧向星系样本中大多数星系的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 发射线比值随 R/R_e 变化较为明显, 为了量化 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 的变化并便于挑选出中心处 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 较高的星系, 我们计算了中心和外围的平均 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 。中心区域采用 $0.5 R_e$ 内所有 Spaxel 的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 的平均值。考虑到 MaNGA 有 2/3 的星系外围覆盖到 $1.5 R_e$ 区域, 我们选取位于 $1.3 \sim 1.5 R_e$ 的 Spaxel 的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 平均值作为盘边缘处的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 值。我们在图 9 中画出了 608 个侧向星系两个位置的平均 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 比值直方图, 以及在这些星系中两个位置的平均光谱信息在 N2S2 图上的分布情况。



注: a) 红色代表星系中心 $0.5 R_e$ 范围内的 $[N II]/[S II]$ 平均值, 蓝色代表星系外围 $1.3 \sim 1.5 R_e$ 范围的 $[N II]/[S II]$ 平均值。b) 红色代表星系中心, 蓝色代表星系外围, 黑色虚线表示 SDSS 星系分界线, 红色实线表示 MaNGA 侧向星系分界线。

图9 星系中心与外围的 $[N II]/[S II]$ 直方图与 N2S2 图分布

从图 9b) 可以看出, 在右下方区域, x 轴方向上星系中心的 $\lg(H\alpha/[S II])$ 要比外围的高出 0.3 dex 左右, 且中心相较于外围的平均 $[N II]/[S II]$ 整体有一个往右下方的偏移, 即移往 $[N II]/[S II]$ 更高的方向。对于同一个星系来说, 中心的 $[N II]/[S II]$ 比外围的高, 这与大多数研究结果相符。

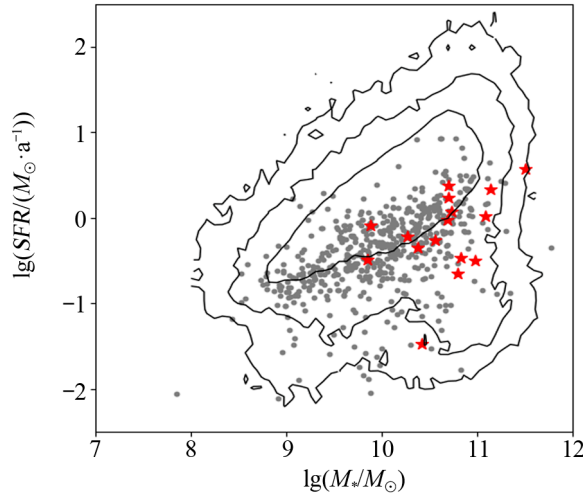
随后我们引入一种百分比的方法, 来衡量星系中心区域有多少 Spaxel 比外围的 $[N II]/[S II]$ 高。为此需要在边缘上选取一个基准, 即上文描述的 $1.3 \sim 1.5 R_e$ 范围的平均值; 其次, 我们统计 $0.5 R_e$ 范围内比该基准高的 Spaxel 所占的比例, 当 $0.5 R_e$ 范围内比基准高 2 倍的 Spaxel 超过 30% 时, 表明该星系中心区域的 $[N II]/[S II]$ 显著比外围高, 一共有 17 个星系符合这个标准。在图 10 中我们画出了这 17 个星系在质量与恒星形成率关系上的位置, 发现这些星系多数位于绿谷星系区域, 恒星质量范围覆盖 $10^{10} \sim 10^{11.5} M_{\odot}$, 恒星形成率在 $1 M_{\odot}/a$ 附近。这些星系是整个侧向星系样本中更蓝、恒星形成率更高且质量更大的星系。

3.3 MaNGA 侧向星系的金属丰度分布

在本节中我们将研究星系中的金属分布, 而金属丰度的测量依赖强发射线的比值, 但这些比值除了与金属丰度有关, 还依赖于气体的电离状态, 而 AGN 的电离状态与恒星形成星系的电离状态显著不同^[23]。本文中采用的金属丰度探针都是根据恒星形成区进行校准的, 可能不适用于电离参数或 ISM 压力与典型的恒星形成区不同的系统, 而 AGN 会潜在地导致金属丰度测量偏高, 因此在后面的分析中我们只考虑恒星形成区的金属丰度。

3.3.1 金属丰度的测量方法

上一节我们研究了 N2S2 诊断图, 以及 $[N II]/[S II]$ 发射线比值在星系中的分布。因为使用了直接测量值, N2S2 诊断图和 $[N II]/[S II]$ 发射线比值避免了各种金属丰度测量标度关系的不确定性。然而, N2S2 诊断图和 $[N II]/[S II]$ 发射线比值不能直接体现金属丰度的



注: 等值线为 SDSS 星系数目的对数值相等连成的线, 红色的星表示选出的 17 个中心的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 比外围显著高的星系, 灰色的点为 MaNGA 侧向星系。

图 10 中心 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 比外围显著高的星系的质量-恒星形成率关系图

值, 例如 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 发射线比值还受到电离参数的影响。因此, 我们尝试使用几种常用的金属丰度探针, 对侧向星系的 MaNGA 光谱估计其对应的金属丰度, 并考察这些金属丰度测量值在侧向星系中的分布。我们使用强发射线比的经验方法来估计气体金属丰度, 如 R23 ($\lg(([\text{O II}]+[\text{O III}])/\text{H}\beta)$)、N2 ($\lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$) 和 O3N2 ($\lg([\text{O III}]/\text{H}\beta) - \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$), 以及与 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 直接关联的 N2S2H α ($\lg([\text{N II}]/[\text{S II}]) + 0.264 \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$) 方法。

对于 O 丰度的测量, R23 是最广泛采用的参数之一。然而 R23 存在一个严重问题是它是双分支的, R23 与 O/H 之间出现非单调关系, 随着金属丰度的增加, R23 呈现先增加后下降的趋势, 大约在 $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.4$ 附近 R23 变得简并。因此使用该方法之前需要划分富金属支和贫金属支, 我们参考 Kewley 和 Dopita^[24] 提出的使用 $[\text{N II}]/[\text{O II}]$ 和 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 的组合来打破 R23 的简并性: 对于 $\lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) > -1.1$ 和 $\lg([\text{N II}]/[\text{O II}]) > -1.2$ 的光谱定义为富金属区; $\lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -1.3$ 和 $\lg([\text{N II}]/[\text{O II}]) < -1.2$ 的光谱定义为贫金属区; 对于 $-1.3 < \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -1.1$ 的光谱定义为转置区, 并将这些 Spaxel 排除在进一步的分析之外。在所有 MaNGA 侧向星系的光谱中, 位于富金属区的有 422 324 个 (98.12%), 贫金属区的有 4 837 个 (1.12%), 转置区的有 3 271 个 (0.76%)。

对于 R23 方法, 我们使用 M91 校准。M91 校准由 Kobulnicky 等人^[25] 给出, 富金属支校准公式为:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.061 - 0.2 \times R_{23} - 0.237 \times R_{23}^2 - 0.305 \times R_{23}^3 - 0.0283 \times R_{23}^4 - O_{32} \times (0.0047 - 0.0221 \times R_{23} - 0.102 \times R_{23}^2 - 0.0817 \times R_{23}^3 - 0.00717 \times R_{23}^4). \quad (3)$$

贫金属支为:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 7.056 + 0.767 \times R_{23} + 0.602 \times R_{23}^2 - O_{32} \times (0.29 + 0.332 \times R_{23} - 0.331 \times R_{23}^2). \quad (4)$$

N2 与金属丰度的关系不是线性的, 在非常低的金属丰度下, N2 与 N 丰度呈简单的线性关系; 在金属丰度稍高, 次级 N 占主导地位时, N2 随着 O 丰度的增加而迅速增加, 最常用的 N2 校准公式来自 Pettini 和 Pagel^[26], 简称 PP04 N2, 该校准的有效范围为 $-2.5 < \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -0.3$ 。我们采用三阶 PP04 N2 校准公式: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.37 + 2.03 \times N_2 + 1.26 \times N_2^2 + 0.32 \times N_2^3$ 。

O3N2 参数与 O 丰度之间的线性关系仅对 $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.0$ 有效, 对于低金属丰度范围 ($\lg([\text{O III}]/\text{H}\beta) - \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) > 2$), 该参数与金属丰度无关。PP04 O3N2 校准公式为: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.73 - 0.32 \times O_3N_2$ 。

N2S2H α 是由 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 发射线比发展而来的。Dopita 等人^[27]发现, 使用 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 结合 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 可以获得丰度的良好估计, 由此提出“N2S2H α ”校准方法。对于该校准, 线性拟合在 $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 9.05$ 时都很好, N2S2H α 校准可以表示为: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.77 + N_2S_2H_\alpha$, 我们使用五次项修正形式: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.77 + N_2S_2H_\alpha + 0.45 \times (N_2S_2H_\alpha + 0.3)^5$ 。

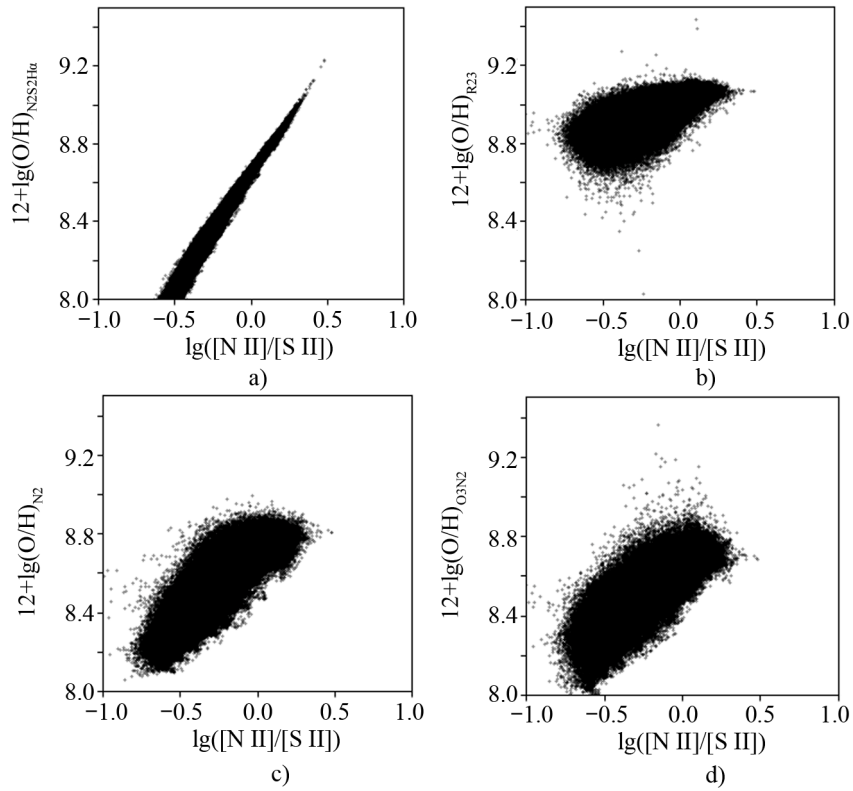
3.3.2 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 与金属丰度之间的关系

在计算了各金属丰度以后, 我们首先建立了 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 与金属丰度之间的关系, 如图 11 所示。可以看出, N2S2H α 与 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 之间存在较好的线性关系, 在 $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.0$ 时会出现非线性收敛, 因此取其中的线性区间 $8.0 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.8$ 作为可用的金属丰度范围。对于 R23 方法, 金属丰度和 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 之间尽管存在一定的相关性, 但是相关性较差; 我们还注意到使用 R23 方法计算出来的金属丰度值比其他几种方法高, 其测量所得的金属丰度区间约为 $8.6 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 9.1$ 。N2 与 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 存在较好的相关性, 其线性关系可以一直延伸到 $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 9.0$ 以上, 考虑到 N2 丰度测量方法的适用范围 ($-2.5 < \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -0.3$), 其对应 N2 丰度在 $8.1 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.85$ 之间。O3N2 和 N2 类似, 考虑到该公式是由 $-1 < \lg([\text{O III}]/\text{H}\beta) - \lg([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < 1.9$ 数据定标而来, 因此 O3N2 丰度适用范围为 $8.2 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 9.0$ 。

3.3.3 侧向星系金属丰度的空间分布图像

在测量了金属丰度之后, 我们考察 MaNGA 侧向星系中这些金属丰度值的分布。在引言中, 我们介绍了一系列利用二维光谱对星系中金属丰度分布进行研究的工作。虽然这些研究中目前还没有专门针对大样本侧向星系的, 不过我们已经可以从以往的研究中了解到, 盘星系的金属丰度大多具有中间高、外围低的特点。

我们检查了 608 个侧向星系使用不同方法测量得到的金属丰度分布图像, 验证了这一点。我们发现, 大部分星系的丰度图像都呈现中间高外围低的特点。这样的特点在考察 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 随 R/R_e 变化的时候已有所体现。比较有启发意义的是, 比较不同测量方法得到的金属丰度在侧向星系中空间分布是否一致。在图 11 中我们看到不同金属丰度测量结果, 尽管有系统性的偏差, 但都有一定的相关性。只是这样的相关性是否在空间分布上也能保持还有待考察。同时我们发现, 大部分星系中不同方法测量的金属丰度在星系中的空间分

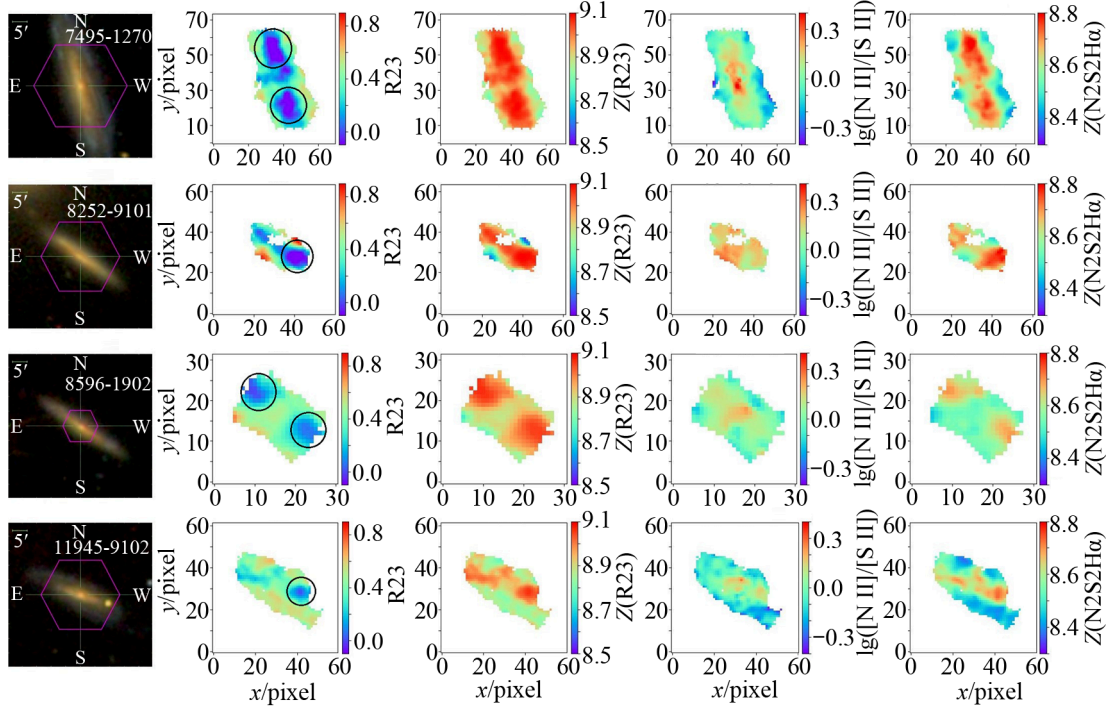


注: a)、b)、c)、d) 纵坐标分别为 $N2S2H\alpha$ 丰度、 $R23$ 丰度、 $N2$ 丰度和 $O3N2$ 丰度。

图 11 $[N II]/[S II]$ 与不同金属丰度之间的关系

布大体是一样的。不过, 我们还需要进一步研究来确定这样的差别是因为不同金属丰度定标方法上还需要优化, 还是反映了星系中的某些特性。例如, 我们已经发现适用于大样本的 $R23$ 金属丰度标度关系, 因其固有的“双分支”特点, 在利用空间可分辨光谱研究金属丰度的空间分布时, 有时会带来困扰。

图 12 展示了我们通过目视辨认的方法筛选出的 $R23$ 丰度测量可能存在问题的星系。由 $R23$ 指标测出的金属丰度在一些区域(由黑色圈表示)具有高金属丰度, 这些区域都恰好在侧向星系的外围, 可能与外部区域对贫金属气体的吸积有关。我们猜测有以下原因: 由于 MaNGA 的分辨率有限, 对外部区域的观测信噪比不高; 此外, 侧向星系盘内的尘埃太厚, 即使考虑了消光, 也无法还原真实的流量; 当我们使用 $R23$ 时, 会把大部分区域的光谱划分到富金属区, 导致计算出的丰度偏高。因此, 对于这些区域的 $R23$ 金属丰度测量, 要重新评估其在“双分支”中的选择判据, 并审视其金属丰度测量过程。不过这样的星系并不多。在 608 个侧向星系中, 我们粗略筛选出几个星系, 对这些星系的研究将在我们的后续工作中进行。



注：从左往右依次为宽波段图像、R23 值、R23 丰度、[N II]/[S II] 和 N2S2H α 丰度。

图 12 R23 丰度测量可能存在问题的星系

4 总结与展望

本文通过构建 608 个 MaNGA 侧向星系样本，使用了 N 和 S 这两个常见的金属元素的发射线比和由此演变而来的 N2S2 图，先后探究了 SDSS 星系和 MaNGA 侧向星系在 N2S2 图上的分布，以及 [N II]/[S II] 在 MaNGA 侧向星系上的特征。最后在此基础上定量计算了 N2S2H α 的金属丰度，并与其他常见的金属丰度测量方法（如 R23、N2 和 O3N2 方法）作了比较，由此得到以下结论。

(1) SDSS 星系与 MaNGA 侧向星系都会在 N2S2 图上呈现一个双峰分布，只不过侧向星系相对于 SDSS 星系整体往左上方偏移 0.3 dex。我们定义 SDSS 星系的双峰分界线： $\lg(\text{H}\alpha/[\text{N II}]) = 1.05 \times \lg(\text{H}\alpha/[\text{S II}]) - 0.15$ ，该分界线将星系分成两支，右下支是 [N II] 相对于 [S II] 较高的，左上支是 [N II] 相对于 [S II] 较低的，不同支的星系可能对应于不同的形成机制。另外，针对 SDSS 星系的研究分析表明，恒星质量越大的星系越倾向于拥有更高的 [N II]/[S II]。

(2) [N II]/[S II] 在 MaNGA 侧向星系上的空间分布表明，绝大多数星系的 [N II]/[S II] 呈现负梯度分布，即 [N II]/[S II] 随着离中心的距离 R/R_e 增加而单调下降，但是也存在 20 个星系没有这样的趋势。在 [N II]/[S II] 的空间分布图中，我们发现有个别星系中心会呈现

一个垂直盘面的双锥状结构, 在这个双锥区域内有较明显的 $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 增丰, 可能暗示这些星系受到较明显的外流影响。

(3) $[\text{N II}]/[\text{S II}]$ 与 $\text{N2S2H}\alpha$ 、 N2 和 O3N3 丰度之间的相关性较好, 但是与 R23 之间存在一些偏差。并且在侧向星系金属丰度的分布图像中, 有部分星系的 R23 丰度测量可能存在问题, 由 R23 指标测出的金属丰度在侧向星系外围的某些区域反而更高。我们推测 R23 金属丰度测量在空间分辨的光谱应用中有些情况下可能需要重新定标, 特别是评估其在“双分支”中的选择判据需进一步优化。

我们的研究对使用 N 和 S 来探究侧向星系金属丰度的空间分布具有一定的启发性, 相较于以往对单个星系的研究, 我们构建了一个包含 608 个侧向星系的样本, 从统计上检查了侧向星系不同区域的金属分布情况, 并且验证了大多数侧向星系的金属丰度呈现中心高外围低的特点。这对我们理解星系的演化与物质循环过程 (包括外流、吸积等) 具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Tumlinson J, Peeples M S, Werk J K. *ARA&A*, 2017, 55: 389
- [2] Chisholm J, Tremonti C, Leitherer C. *MNRAS*, 2018, 481: 1690
- [3] Pérez-Montero E, Contini T, Lamareille F, et al. *A&A*, 2013, 549: A25
- [4] Dopita M A, Fischera J, Sutherland R S, et al. *ApJS*, 2006, 167(2): 177
- [5] Kewley L J, Ellison S L. *ApJ*, 2008, 681(2): 1183
- [6] Maiolino R, Mannucci F. *A&ARv*, 2019, 27(1): 3
- [7] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. *PASP*, 1981, 93(551): 5
- [8] Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. *ApJ*, 2014, 798(1): 7
- [9] Blanton M R, Kazin E, Muna D, et al. *ApJ*, 2011, 142(1): 31
- [10] Law D R, Cherinka B, Yan R, et al. *ApJ*, 2016, 152(4): 83
- [11] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500(2): 525
- [12] Bizyaev, D V, Kautsch S J, Mosenkov A V. *ApJ*, 2014, 787: 24
- [13] Jones A, Kauffmann G, D'Souza R, et al. *A&A*, 2017, 599: 141
- [14] Calzetti D, Armus L, Bohlin R C. *ApJ*, 2000, 533: 682
- [15] Osterbrock D E, Bochkarev N G. *SvA*, 1989, 33: 694
- [16] Kroupa P. *MNRAS*, 2001, 322: 231
- [17] Sabbadin F. *A&A*, 1980, 84: 216
- [18] Delgado G, Viironen K, Mampaso A, et al. *RMxAC*, 2005, 24: 229
- [19] Moustakas J, Kennicutt Jr R C. *ApJ*, 2006, 651(1): 155
- [20] Viironen K, Delgado-Inglada G, Mampaso A, et al. *MNRAS*, 2007, 381(4): 1719
- [21] Kewley L J, Dopita M A, Sutherland R, et al. *ApJ*, 2001, 556(1): 121
- [22] Dirks L, Dettmar R J, Bomans D J, et al. *A&A*, 2023, 678: A84
- [23] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. *MNRAS*, 2003, 346(4): 1055
- [24] Kewley L J, Dopita M A. *ApJS*, 2002, 142(1): 35
- [25] Kobulnicky H A, Kennicutt Jr R C, Pizagno J L. *ApJ*, 1999, 514(2): 544
- [26] Pettini M, Pagel B E. *MNRAS*, 2004, 348(3): L59
- [27] Dopita M A, Kewley L J, Sutherland R S, et al. *Ap&SS*, 2016, 361: 1

The Study of Nitrogen and Sulfur Emission Line Ratios in Edge-on Galaxies

DOU Baolian^{1,2}, HAO Lei^{1,2}, YIN Jun^{1,2}, LIN Minyi³

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmolgy, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Accretion and feedback constitute the material cycle between galaxies and their environment, and metallicity is closely related to this cycling process. By utilizing a sample of 608 edge-on galaxies obtained from the MaNGA integral field survey, we examine the nitrogen and sulfur emission line ratios, as well as the distribution of metallicity. The study shows that the MaNGA edge-on galaxy sample and SDSS galaxies exhibit similar bimodal distributions on the N2S2 diagram, with the MaNGA edge-on galaxies slightly shifted towards the upper left. Additionally, the [N II]/[S II] ratio is generally higher at the centers of most galaxies compared to their outer regions, with four galaxies centers displaying a conical structure of nitrogen enrichment. Lastly, the spatial distribution of metallicity in edge-on galaxies measured by different methods is generally consistent, with only a few galaxies showing higher oxygen abundance in their outer regions compared to their centers, which may be related to the selection criteria for the R23 “double branch” method and requires further optimization.

Key words: material cycle; metallicity; N2S2 diagram