

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.02

# 纤维环境对星系恒星形成活动影响 的研究进展

杨思睿<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 由星系组成且延伸尺度可达数百秒差距的大尺度结构称为宇宙网, 根据形态和星系密度的不同, 宇宙网分为结点、纤维、墙、空洞等结构, 其中, 靠近纤维的星系通常具有较高的质量, 并且比空洞中的星系有更高比例的早型红色星系。观测和模拟结果表明, 当星系接近纤维时, 其恒星形成活动会减弱。有几个因素可能对此结果带来不确定性: (1) 不同算法识别的纤维结构可能存在差异; (2) 对纤维结构几何性质有不同测量方法; (3) 在纤维附近的星系通常具有较大的恒星质量, 局部环境星系密度较高, 宿主暗晕质量较大, 这些因素也会引起星系恒星形成活动的变化。回顾了研究宇宙网的算法, 探讨在控制恒星质量、星系密度、暗晕质量等因素情况下纤维对恒星形成活动的影响, 以期理解星系的恒星形成活动在纤维环境中受到的影响。

**关键词:** 宇宙纤维; 星系淬灭; 恒星形成

**中图分类号:** P145.2 **文献标识码:** A

## 1 引 言

宇宙网是已观测宇宙中最大尺度的结构, 具有分形自相似性, 在不同尺度的范围上可以划分出不同的结构。通常宇宙网中星系数密度较低的结构称为“空洞”, 密度高的部分称为“结点”; 稀疏的结构, 或完全没有星系的“空洞”(voids), 占据了几乎 95% 的宇宙空间<sup>[1,2]</sup>。“纤维”和“墙”代表中等密度的结构, 长度从几十到几百 Mpc 不等。关于墙结构的直接观测较少, 著名结构有 CfA2 长城<sup>[3]</sup>、斯隆长城<sup>[4]</sup>、赫克托长城<sup>[5]</sup>。宇宙纤维结构在低红移处, 有包括斯隆巡天 (SDSS)<sup>[6]</sup> 等在内的大量观测证据。通过莱曼  $\alpha$  辐射, 天文学家还可

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-11-01

资助项目: 国家自然科学基金 (11922305)

通讯作者: 杨思睿, adh593la@gmail.com

以描绘出高红移时宇宙纤维的形态和物理特性。Wang 等人<sup>[7]</sup>发现了大爆炸后仅 8.3 亿年就存在的纤维结构，它由明亮的类星体定位，10 个星系组成，延伸 300 万光年。

研究宇宙大尺度结构，对人们理解宇宙大爆炸、建立和修改宇宙学模型等基础问题有所帮助。一般认为宇宙暴胀产生微小的原初扰动，并在引力作用下坍缩形成大尺度纤维。在冷暗物质和温暗物质等不同的宇宙模型中形成的纤维结构，在形态上将具有明显差异。在观测和模拟中研究大尺度结构，有助于限制如暗物质密度、暗能量密度和哈勃常数等宇宙学参数。多样的大尺度环境也为人们研究星系形成与演化过程提供了试验场所。连接着星系和星系团，由暗物质和重子物质(星系、气体等)组成的细长结构——纤维，其附近的星系具有几个明显区别于场星系的特性：(1) 纤维中星系的质量要高出纤维之外星系的。Laigle 等人<sup>[8]</sup>用 COSMOS 巡天<sup>[9]</sup>的数据研究了星系的质量剖面曲线，发现大质量星系要比小质量星系的分布更靠近纤维中心。星系在沿着宇宙纤维进入星系团的过程中，可能以并合的形式逐渐增加质量<sup>[10]</sup>。(2) 靠近纤维的早型星系比例更高，且星系颜色更红。Kuutma 等人<sup>[11]</sup>研究发现，椭圆/旋涡星系比例 (E/S) 在靠近纤维时上升，并且这一变化与  $g-i$  颜色变化同步；Salerno 等人<sup>[12]</sup>研究发现，红星系的比例在星系团中最高，在纤维结构中居中，在场中比例最低。纤维环境在多大范围内影响到星系中的恒星形成？纤维是否输送重子物质？纤维的增长与演化是否与星系的并合与演化同步？回答这些问题，不仅能促进星系演化研究，还能对大尺度结构性质与形成过程加深理解。

第 2 章列举了几种找纤维结构的算法。第 3 章介绍了纤维环境对星系恒星形成活动影响的研究进展，其中 3.1 节概述了在观测和模拟中观察到的纤维附近星系形成活动下降的现象；3.2 节讨论了控制暗晕质量、局部星系密度场等影响变量后对纤维环境淬灭机制的研究结果，以及不同变量的重要性排序(随机森林)；3.3 节介绍了宇宙网通过气体运输促进恒星形成活动的可能性。第 4 章进行总结与展望。

## 2 查找宇宙网结构的几种算法介绍

Liebeskind<sup>[13]</sup>在研究中总结了一些查找宇宙网的算法。作为补充，本文回顾最为常用的 DisperSE (Discrete Persistent Structures Extractor) 算法，并列举了 Sconce、MCPM、Bisous 模型和简单连接网络等算法，对算法优缺点进行比较，并在表 1 中进行总结。

### 2.1 DisperSE

常用的结构查找器 DisperSE 可以提取持久的拓扑特征，如峰、空洞、墙，并追踪连接它们的纤维<sup>[14]</sup>。DisperSE 程序从场数据开始，即一组离散点，这些点可能来自星系坐标、暗晕位置，或可以在模拟中使用暗物质粒子作为输入数据。接着，DisperSE 用 DTFE (Delaunay Tessellation Field Estimator)<sup>[15]</sup>对场进行镶嵌，并在每个镶嵌顶点计算和相邻值(取离该点最近的两个顶点)的平均，得到平滑的密度场。密度场中的结构被识别为莫尔斯·斯梅尔复形 (Morse-Smale complex) 上的函数。密度函数梯度为 0 的点为临界点，由函数最大值、最小值和鞍点组成。在 DisperSE 中，纤维是一维结构，是一个梯度上升或下降的单流形 (one-

表 1 查找纤维的算法比较

算法名称	输入数据类型	算法原理	优势	不足
Disperse <sup>[16]</sup>	离散点 (星系或暗物质粒子坐标)	拓扑方法, 以镶嵌方式构建密度场, 在流形上寻找纤维结构	快速有效地查找纤维结构并避免噪声	天球高赤纬区域恢复精度较低
Sconce <sup>[19,20]</sup>	离散点 (星系) 球面坐标	对星系密度场作核密度估计, 迭代收敛找出密度脊	在天球坐标系下, 对各赤纬处纤维的恢复较均匀	可能遗漏一些短纤维结构
MCPM <sup>[24]</sup>	离散/稀疏点 (星系/快速射电暴) 坐标	受黏菌行为启发的概率模型	在低密度星系区域也可以重建宇宙网结构	占用计算资源大
Bisous <sup>[28]</sup>	离散点 (暗晕) 坐标	通过概率密度模型寻找方向一致的“小圆柱体”	不依赖密度场平滑, 恢复精度高	参数多, 容易过拟合; 微调难度大
四面体连接网络 <sup>[29,31]</sup>	离散点 (星系) 坐标	通过几何模型设定判断标准, 区分不同结构	不依赖密度场平滑, 构造简单快速	不能直接找出纤维点, 宇宙网重建精度低

manifold), 由从给定鞍点出发并连接两个最大值点的两条积分线 (在每一点上与梯度场相切的曲线) 组成。

数据中的拓扑结构可能存在不稳定性。例如, 数据噪声可能会制造一些临时的结构, 而在不同尺度上的平滑处理可能导致这些结构的消失。DisperSE 通过测量结构的拓扑持久性 (topological persistence)<sup>[16]</sup> 来识别和量化这些结构的显著性。它计算一对临界点 (如极大值和鞍点) 之间的持久性比率, 并删除在随机场中出现概率小于设定阈值的点。通过设定较低的阈值, 可以发现更多的纤维结构。

## 2.2 Sconce

对于二维和三维的离散点坐标, Zhang 等人<sup>[17]</sup> 开发了两个 python 包 (DirSCMS, DirLin SCMS) 寻找纤维结构。Sconce 算法的原理包含两个过程: (1) 在等距放置的网格点上, 利用球面坐标系的方向密度核 (directional kernel density estimator)<sup>[18,19]</sup> 和相应的平滑带宽参数 (带宽越大, 密度场越平滑) 计算出密度场; (2) 通过类似于梯度上升的迭代过程, 直接寻找出密度脊, 由 Hessian 矩阵定义的 (法方向上) 局部密度最大值组成。Sconce 算法能有效避免在将红移换算为共动距离时, 上帝之指效应<sup>[20]</sup> 引起的虚假纤维结构, 并且能够在三维空间中同步构建平行与垂直视线方向上的纤维。

Zhang 等人<sup>[17]</sup> 在其文章图 4 中比较了 Sconce 算法与 DisperSE 算法找出的纤维结构的差异。他们发现, 在天球的高赤纬区域, DisperSE 找出的纤维结构不规则且可能含有许多虚假成分, 在寻找短纤维结构上更有优势, 可以用来查找“簇须” (tendrils) 结构; 而 Sconce 对纤维的恢复精度更高, 在寻找长纤维结构时优势明显, 避免了重新连接短纤维结构可能

出现的误差。

### 2.3 MCPM

蒙特卡洛绒泡黏菌算法 (Monte Carlo Physarum Machine, MCPM)<sup>[21]</sup> 受到 Jones<sup>[22]</sup> 工作的启发, 参考了生物有机体聚绒泡黏菌在寻找食物时产生高效的互连网络<sup>[23]</sup>。算法中, “黏菌” 沿着“引诱剂” 路径移动, 在每个时间步长释放自己的沉积物, 找到最佳的运输网络。MCPM 将这个模型调整到三维, 以概率的方式对可能的路径进行采样, 这样通向较小沉积物的路径仍然可能被遍历。这一算法的优势是可以对宇宙网中的低密度区域也进行合理的插值。MCPM 已被应用于分析星系和快速射电暴数据<sup>[21, 24]</sup>, 促进了对宇宙网中星系间中性氢和热电离气体的研究。

### 2.4 Bisous 模型与连接网络算法

一些算法通过宇宙网自身连接的几何特性, 再结合统计方法, 不需要对密度场作插值、平滑和估算就可以找出宇宙网结构。Tempel 等人<sup>[25]</sup> 提出的 Bisous 模型假设星系聚集在不同小圆柱体里, 如果相邻的圆柱体以相似的方向排列就可以组合成纤维, 每个小圆柱体可以用中心点坐标、圆柱的高、底半径和方向矢量 4 个参数标记。模型接着计算概率密度场, 依照泊松分布的概率密度函数以系统的能量为主要参数 (在物理学中相当于系统的总吉布斯能量, 这里由星系场中圆柱体的位置、对齐量和连接度决定), 最后在概率密度较高的区域提取纤维结构。Bisous 模型能够在考虑网络连通性的基础上精确提取纤维, 不过实现较为复杂。

Hong 和 Dey<sup>[26]</sup> 提出, 当两个星系之间的距离小于给定的“连接长度”时, 它们被视为连通的。首先, 已知数据集较大的随机网络展现出泊松分布的特征<sup>[27]</sup>。每次随机过程都是一次二项试验, 计算  $n$  次撒点在以长度  $l$  为半径的球形空间中的分布, 可以得到一个类似泊松分布的公式, 其均值可以用  $l$  和  $n$  表示; 因此可以通过构造泊松分布来确定连接长度, 并用于查找星系之间的连通性, 通过每个点上的连接度来划分空洞 (连接度最低)、墙和结点 (连接度最高) 几种结构。

Martínez 等人<sup>[28]</sup> 提出, 可以先找出纤维所连接的“结点对”, 再通过计算星系过密度筛选出纤维。具体来说, “结点对” 需要满足两点之间的投影方向上的距离和视线方向上的距离分别小于一个给定的值, 同时投影距离要大于两个暗晕的位力半径之和, 以确保找出清晰的结构; 随后构建“结点对” 之间的长方形 (高沿视线方向, 底在投影平面上) 并计算其中星系的过密度 (统计其中星系的数目, 与场中同样空间和红移范围内的星系数目进行比较), 过密度大于 1, 则判定为纤维结构。这两种方法快速直观、对计算资源消耗很小, 不过 Hong 和 Dey 的方法对参数 (连接长度) 的依赖性较大, 并且无法直接构造纤维网络; Martínez 等人的方法依赖视线距离和投影距离的阈值参数, 且对星系位置和红移的数据精度要求较高, 测量误差可能影响结果, 目前主要应用于星系所在的宇宙网环境的区分。

### 3 宇宙网环境下星系淬灭的研究

从恒星形成活跃的“蓝星系”，演化至恒星形成停止的“红星系”，这一过程在宇宙学时标上相对短暂，两者之间的过渡阶段被称为“绿谷”(green valley)，在颜色-光度图上呈现为狭窄的分布<sup>[29]</sup>。星系的恒星形成与淬灭机制是复杂的，受到星系内性质比如质量、形态，外在环境比如暗晕、局部星系密度、大尺度结构等多种因素的影响。Dressler<sup>[30]</sup>提出著名的环境密度与星系形态的关系，星系团星系比场星系更可能具有椭圆形态，而后者通常是旋涡星系。Jaffé 等人<sup>[31]</sup>将观测到的星系按是否探测到中性氢以及红蓝颜色分类绘制在速度-相位图上，研究了中性氢气体在星系团中的冲压剥离机制<sup>[32]</sup>。Lotz 等人<sup>[33]</sup>模拟了星系在星系团中被“预处理”的轨道，发现速度方向呈径向的卫星星系大多数在第一次下落时就因气体剥离效应<sup>[34]</sup>被迅速淬灭。宇宙纤维作为密度低于星系团、高于空洞的结构，其中是否存在与上述研究类似的星系淬灭过程仍有待检验。

#### 3.1 纤维中的星系淬灭：观测和模拟中的研究结果

不同观测和模拟都研究了靠近纤维时星系的恒星形成活动变化。衡量星系形成活动的变化，有几个常用的统计指标：(1) 通过计算星系的颜色，如  $u - r > 1.8$  为红星系<sup>[36]</sup>，也可以在  $g - r/u - g$  图上作划分，如  $(g - r) > 0.234(u - g) + 1.03$ <sup>[37]</sup>；(2) 通过计算  $sSFR$  (星系恒星形成率与星系恒星质量的比值) 发现， $sSFR$  呈现出与颜色图高度一致的双峰分布<sup>[38]</sup>，因此也可以为星系是否淬灭提供快速判断；(3) 划分样本后，计算淬灭星系占总样本的比例 (quenched fraction) 作为统计量。这里介绍几篇应用不同统计指标，观测到星系形成活动随着不同宇宙环境变化的研究。

Kuutma 等人<sup>[11]</sup>使用斯隆巡天第 10 次发布 (SDSS Release10)<sup>[39]</sup> 的数据，采用星系动物园 (Galaxy Zoo) 对星系进行分类，其文章的图 3 统计了椭圆/旋涡星系比例 (E/S) 和星系的  $g - i$  颜色从距离纤维  $10 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$  到  $0.1 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$  处的变化，发现靠近纤维时较亮的星系趋向于变红，而较暗的星系在误差棒之外没有明显的变化；椭圆与旋涡星系的数量比值随着靠近纤维而上升，与  $g - i$  值的变化同步。他们提出，形态的转变可能是造成颜色指数变化的原因。不过，在对较亮星系样本区分星系形态后，靠近纤维时星系颜色变红的趋势依然存在。这一趋势对于旋涡星系更显著。

Malavasi 等人<sup>[35]</sup>使用 IllustrisTNG<sup>[40-42]</sup> 模拟在红移 0 处的数据，研究了星系的恒星质量、恒星形成率  $SFR$  和  $sSFR$  随着到纤维距离的依赖关系，如图 1a) 所示。他们在研究中用 DisperSE 算法找出宇宙网 (包括纤维段位置和结点位置等)，并考虑了星系到宇宙网的 3 个距离变量，分别为：星系到宇宙网上最近的结点 (DisperSE 找出的密度函数最大值点以及分岔点) 的距离 ( $d_{cp}$ )；星系到距离最近的纤维段中点之间的距离 ( $d_{fil}$ )；从离星系最近的纤维点 (即星系在最近纤维上的投影位置)，到该纤维连接的两个临界点之一的距离 ( $d_{skel}$ )。无论采取哪种计算方式，3 个星系的性质都对宇宙网距离变量表现出较强的依赖关系。

类似地，Hasan 等人<sup>[43,44]</sup>用 IllustrisTNG 数据分析了星系  $sSFR$  与其至纤维距离的关系，他们将红移范围扩展到 4，并区分了中心星系和卫星星系。研究显示，宇宙网对  $sSFR$  的影响只从红移 2 开始，在更高红移处几乎没有；并且主要是卫星星系受到了环境淬灭的影响，

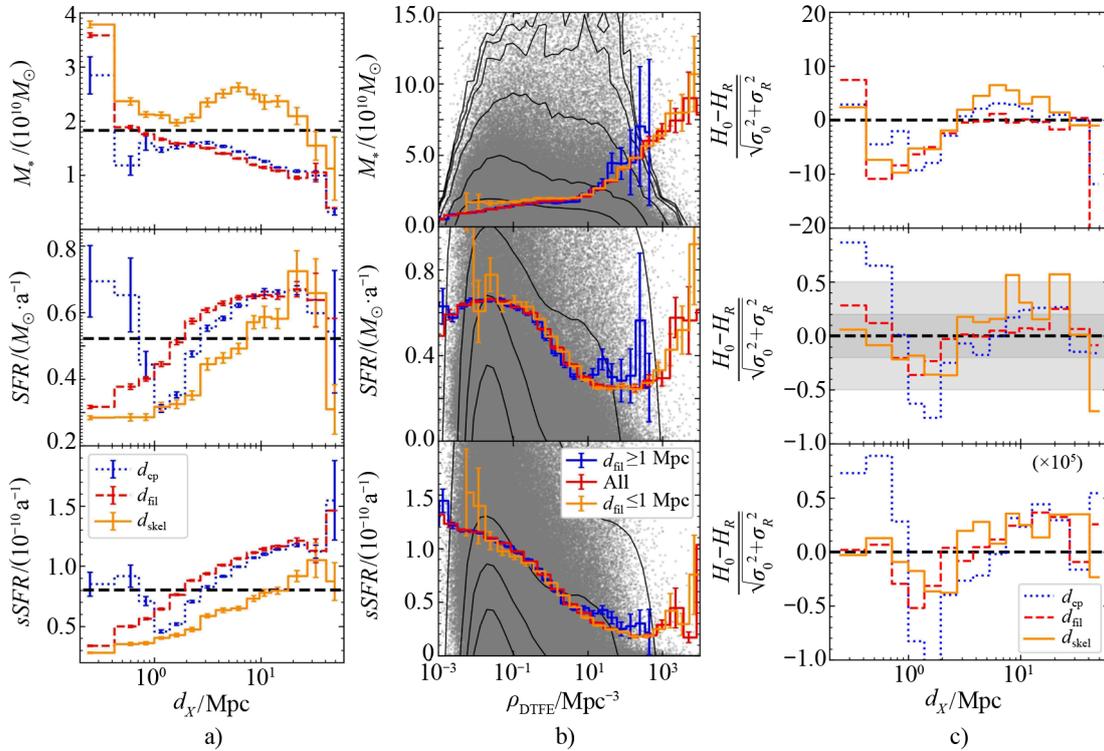
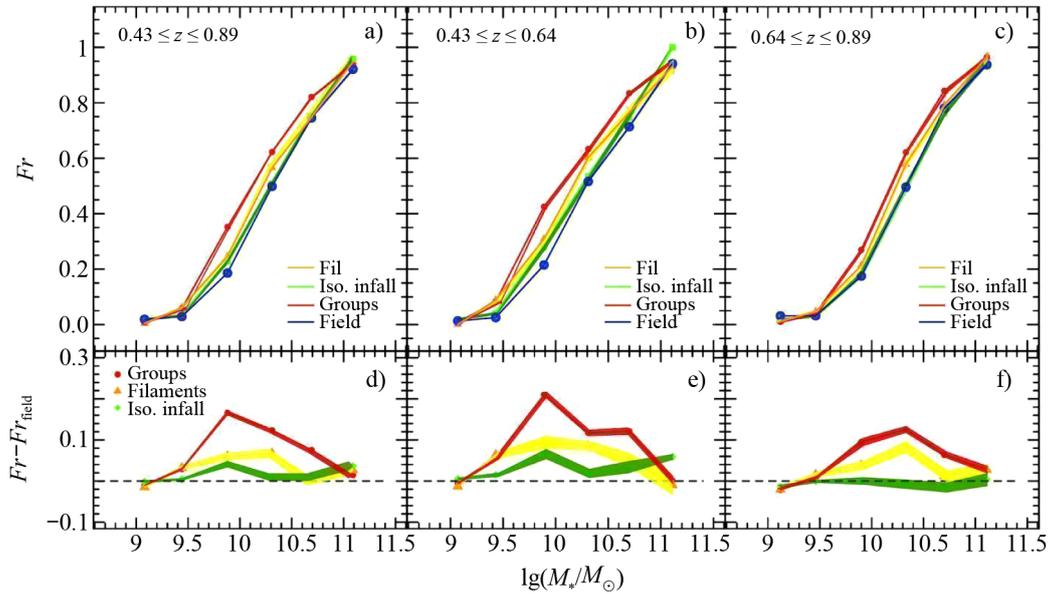


图 1 a) 星系的恒星质量、 $SFR$  和  $sSFR$  随着到纤维距离 ( $d_{cp}$ 、 $d_{fil}$ 、 $d_{skel}$ ) 的变化；b) 星系的恒星质量、 $SFR$  和  $sSFR$  随着局部密度场的变化；c) 星系的恒星质量、 $SFR$  和  $sSFR$  在洗牌前 ( $H_0$ ) 后 ( $H_R$ ) 的差异 (用误差值的均方根归一化) 随着到纤维距离 ( $d_{cp}$ 、 $d_{fil}$ 、 $d_{skel}$ ) 的变化<sup>[35]</sup>

中心星系所受影响非常轻微。

观测上存在宇宙环境在较高的红移上影响星系淬灭的证据。Salerno 等人<sup>[12]</sup>选取了 VI-MOS 河外星系巡天<sup>[45]</sup>中红移范围为 0.43 ~ 0.89 的星系，将它们按所处宇宙环境进行分类，然后分别统计淬灭比例随着星系质量的变化并进行对比。他们发现星系的淬灭比例在场和下落区域中最低，在纤维环境居中，在星系群中最高，如图 2 所示。不过，Salerno 等人没有计算星系至纤维的距离，也没从统计上考虑其他可能导致星系淬灭的因素。

在观测结果和理论模拟中，距离纤维从  $10 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$  到  $0.1 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$ ，多个表征星系恒星形成活动的参数呈现出下降的趋势，模拟研究将这一影响的范围推广至红移 1~2。模拟表明这一趋势主要由卫星星系主导，而观测中也发现这一趋势主要出现在亮度较低的星系上 (通常中心星系比卫星星系亮度更高)。卫星星系恒星质量较小、分布更靠近暗晕边缘，因此可能更容易受到环境的影响。但是，由于低亮度星系恒星形成率变化比较显著，其中可能存在观测偏差，需要进一步的证据来研究大尺度环境导致星系淬灭的范围与机制。



注: a) 对应于整个红移范围, b) 较低的红移区间, c) 较高的红移区间。颜色表示不同环境: 蓝色代表场星系, 绿色代表下落星系, 黄色代表纤维星系, 红色代表群星系, 误差棒用 bootstrap 重复采样计算。d)、e)、f) 以场星系作为基准, 红星系比例在其他环境下与场星系的差异, 这一差异对于群星系、纤维中的星系、下落区域的星系依次递减。

图 2 红色星系的比例作为恒星质量的函数<sup>[12]</sup>

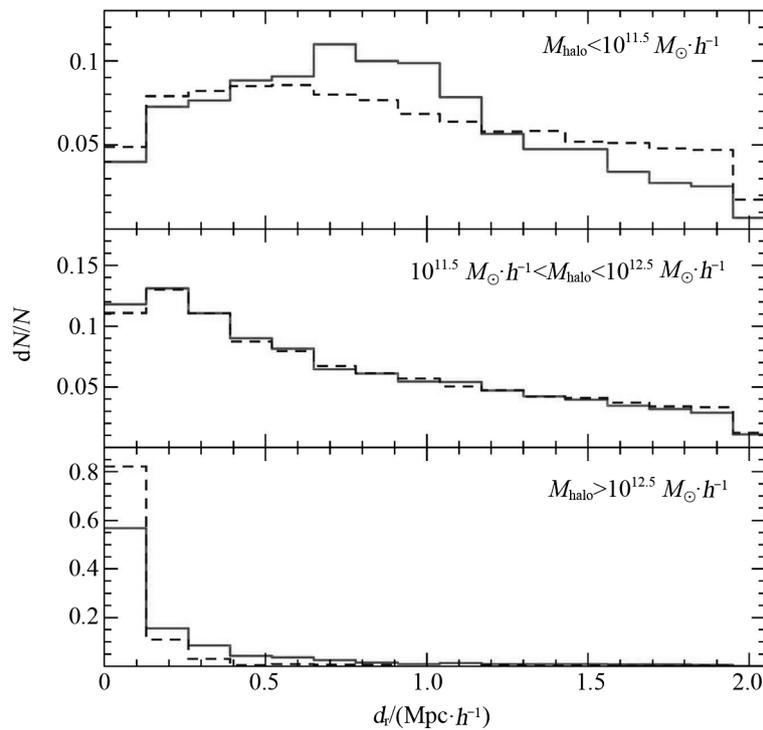
### 3.2 控制影响变量后对环境淬灭的研究结果

星系的恒星质量、星系所在局部环境(即暗晕的质量), 以及潜在的局部星系密度场, 都对星系的恒星形成活动有影响, 并且这些参数之间存在一定简并性。距离纤维越近, 通常对应的恒星质量越大、暗晕质量越大、星系密度越高, 因此在研究中分离变量的影响十分重要。

星系的恒星形成率和恒星质量之间有紧密的联系<sup>[46]</sup>。流体数值模拟研究普遍认为, 超大质量黑洞(SMBH)或活动星系核(AGN)的反馈是导致大质量星系达到淬灭的关键<sup>[47, 48]</sup>。而AGN反馈可以在多种条件下被触发, 如黑洞吸积物质和星系并合等<sup>[49, 50]</sup>, 通过产生快速喷流加热气体导致星系淬灭。大多数(包括3.1节提到的)对环境淬灭的研究都控制了星系质量这一影响变量。

在观测数据<sup>[51-53]</sup>和理论模拟<sup>[54, 55]</sup>中, 研究人员都发现, 星系可能在大质量暗晕中变红或淬灭。暗晕质量影响星系淬灭的机制是, 在临界质量大于 $10^{12} M_{\odot}$ 的暗晕中, 位力激波加热(virial shock heating)来自星系间介质的流入气体, 阻止被吸积的气体直接为恒星形成提供燃料<sup>[56]</sup>。此外, AGN反馈的效率也与暗晕质量相关。Lin等人<sup>[57]</sup>使用SDSS-IV MaNGA巡天<sup>[58]</sup>数据, 将星系淬灭分为由内而外和由外向内两种。冲压压力剥离或气体消耗这样的外部机制, 通常导致由外向内的淬灭; 而AGN反馈将导致相反的趋势(由内而外)。他们发现由内而外的

淬灭占多数，随着恒星质量 (在固定的暗晕质量下) 和暗晕质量 (在固定的恒星质量下) 的增加，由内而外淬灭的星系的比例随之变大。一些研究采取办法控制暗晕质量，来了解纤维环境是否对星系形成有独立于暗晕这一局域环境的影响。Perez 等人<sup>[59]</sup>使用 TNG300-1 数据，将星系分为红星系与蓝星系，并按照暗晕质量大小分为三组 ( $M_{\text{halo}} < 10^{11.5} M_{\odot} \cdot h^{-1}$ ,  $10^{11.5} M_{\odot} \cdot h^{-1} < M_{\text{halo}} < 10^{12.5} M_{\odot} \cdot h^{-1}$ ,  $M_{\text{halo}} > 10^{12.5} M_{\odot} \cdot h^{-1}$ ) 画出星系的分布 (见图 3)。他们发现，在小质量暗晕中，纤维外围区域 (星系到纤维距离在  $1.2 \sim 2 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$  之间) 出现的蓝星系较多。在大质量暗晕中这一趋势相反：蓝星系更多出现在纤维中心 (星系到纤维距离在  $0 \sim 0.1 \text{ Mpc} \cdot h^{-1}$  之间)，红星系主导纤维外围的星系分布，这仍是局部暗晕效应的影响。



注：子图从上到下按照暗晕质量从小到大划分，横轴是星系到纤维的距离，纵轴表示归一化后的星系数量比例。实线和虚线分别表示红色星系和蓝色星系的分布。

图 3 不同暗晕质量范围内星系相对于宇宙纤维的距离分布<sup>[59]</sup>

O’Kane 等人<sup>[60]</sup>使用 SDSS DR8 数据研究了  $SFR$  在恒星形成主序 (star formation main sequence, MS) 的离差，然后衡量恒星形成活动被抑制的程度。在匹配了不同环境中星系的恒星质量后，他们发现纤维中星系的恒星形成活动受抑制程度更高，体现了环境的影响；但是，在同时匹配恒星质量与局部星系密度后，这种影响几乎消失，这说明纤维环境的影响和局部密度场的影响是简并的。如图 1b) 中，Malavasi 等人<sup>[35]</sup>也分析了星系性质对于局部密度场的依赖，密度增加时星系质量增加，星系的  $SFR$  和  $sSFR$  下降，划分不同的星系至纤维距离对研究结果影响较小。当  $\rho_{\text{DTFE}}$  在  $10 \sim 10^3 \text{ Mpc}^{-3}$  之间时， $sSFR$  在小范围内随密度增

加。图 1c) 说明局部密度和到纤维距离这两个变量具有简并关系。为了分离这两个变量对星系性质分布的影响, 他们提出“洗牌”的方法, 即按照密度场的大小分成很多小区间, 在这些小区间内, 随机打散相关星系的性质 ( $SFR$ 、星系质量等) 1000 次, 每次保留星系到纤维的距离 ( $d_{cp}$ 、 $d_{skel}$ 、 $d_{fil}$ ) 不变, 再将小区间按顺序进行组合。如此一来, 每个小区间内相关星系的性质和星系到纤维距离的关系被随机打乱, 同时就组合起来的样本来说, 相关星系的性质与局部密度场之间的关系并没有改变, 也就实现了对密度场变量的控制。他们计算了“洗牌”后结果的平均值 ( $H_R$ ) 与原结果 ( $H_0$ ) 的差异, 用原结果与洗牌后结果误差值的均方根归一化, 结果显示差异几乎在到纤维的不同距离上都大部分是 0, 因此不能排除星系至纤维距离对淬灭起影响是局部密度场的作用<sup>①</sup>。

Song 等人<sup>[61]</sup>使用 HORIZON-AGN 数据, 同时考虑了局部密度场和暗晕质量的影响。以 0.4 倍的暗晕位力半径为标准 ( $d_{fil} = 0.4R_{h,vir} = d_{cut}$ ), 他们区分了在纤维上和纤维附近的星系。在固定局部密度场的情况下, 他们发现在纤维上比纤维附近星系的暗晕质量、星系质量和  $SFR$  普遍更高, 在非常接近纤维时出现了一个跃变式的增加 (见其图 8)。为了去除暗晕的影响, 他们拟合  $SFR$  随暗晕质量变化的关系, 计算  $SFR$  与这一主要关系之间的残差 (见其图 7)。越靠近纤维  $SFR$  残差值越大, 但从大约  $10^{0.5}R_{h,vir}$  处开始下降, 表明星系在纤维附近经历了淬灭的过程。

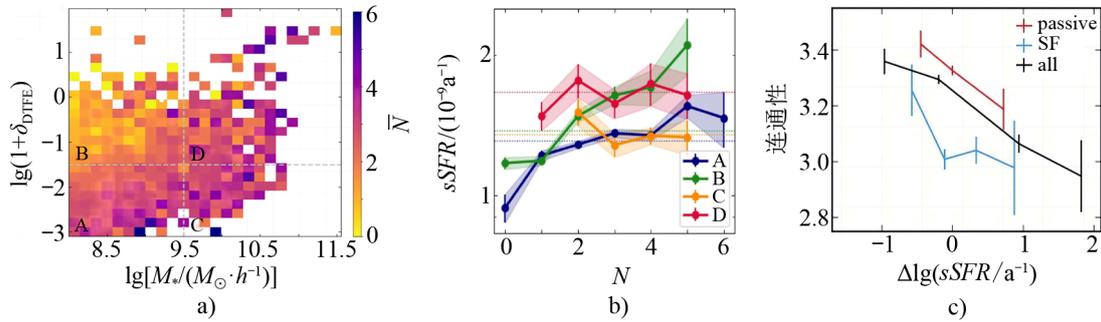
为了比较不同变量对星系淬灭的重要性, 找出对恒星形成活动最具预测意义的参数, 研究者可以采用随机森林方法。随机森林是一种用于对复杂数据进行分类的机器学习方法, 首先, 对数据划分训练集和测试集, 在训练集中随机抽样来构建多个子集。每个子集构建一棵决策树, 用于学习哪些特征参数最适合进行分类 (在星系淬灭的研究中为“恒星形成”与“已淬灭”两类), 每个节点处随机选择一类的概率可以用于计算基尼不纯度<sup>[62]</sup>, 基尼不纯度越高表明特征参数分类能力越差。如果某一特征参数能有效地减少基尼不纯度, 说明该参数对星系淬灭较为重要, 对决策树中基尼不纯度的改变值作加权平均, 可以计算出变量的重要性。Bluck 等人<sup>[37]</sup>分析 MaNGA 观测数据发现, 核球质量是测光参数 (包括核球质量、盘质量、总恒星质量和 B/T 形态) 中最能预测星系淬灭的参数, 而当光谱数据可用时, 中心恒星速度色散更重要。Goubert 等人<sup>[63]</sup>对比几项模拟数据, 发现对于中心星系和大质量卫星星系, 中心黑洞质量是预测淬灭的最佳参数; 而对于小质量卫星星系, 暗晕质量是预测淬灭的最佳参数。随机森林算法也存在一定局限性, 受输入数据的质量和完整性的显著影响, 可能过拟合训练数据, 特别是在树的数量非常大, 或模型调整不当的情况下; 因此, 我们需要借鉴多种方法来研究相关问题。

### 3.3 宇宙网促进星系恒星形成活动的现象与机制

Galárraga-Espinosa 等人<sup>[64]</sup>研究了 TNG50-1 模拟中质量在  $10^8 M_{\odot}$  以上中心星系的“纤维连接度”, 即一个星系连接了几根纤维。如图 4a) 所示, 为了同时控制恒星质量和局部密

<sup>①</sup>我们需要注意的是, 尽管上述观测结果与理论模拟得到了相似的结论, 两者对局部密度的估算方式不同: Malavasi 等人研究中用到的局部密度是从 DTFE 密度场直接计算得到 ( $1 + \delta\rho = \rho_{DTFE}/\rho_{DTFE}$ ), 而 O’kane 等人使用的是投影面上的局部星系密度指数 (projected local galaxy density index)  $\Sigma_3 = M_3/\pi R_3^2$ , 其中  $R_3$  被定义为目标星系与第三近邻星系之间的距离,  $M_3$  是在以  $R_3$  为半径的圆中包含的星系质量。

度场两个变量，他们首先将星系分为 4 组，分别为 A、B、C、D。图 4b) 绘制了  $sSFR$  随着纤维连接度的变化。从图中可以看出，A 组和 B 组 (恒星质量较小的组别)  $sSFR$  随着纤维连接度的增加而显著上升，也就是更多的纤维促进了恒星形成活动增强；他们认为这一效应可以用 Kereš 等人<sup>[66]</sup>的工作解释，这些小质量星系的宿主暗晕可能没有足够的质量维持激波带来的影响，于是冷气体沿着纤维流入暗晕中心的星系。同时，C 组和 D 组星系在图中几乎不随纤维连接度变化，这说明在大质量星系中，恒星形成更可能由内部过程调节而与通过纤维流入的冷气体无关。这可能与 Gabor 和 Davé<sup>[67]</sup>的工作相关，Gabor 和 Davé 使用热气体淬灭模型时发现，尽管红色星系往往在更密集的环境中，但也存在很多孤立于大尺度环境的红色中心星系，它们生活在热暗晕中。



注：a) 中像素颜色表示给定质量和 DTFE 密度区间内纤维流 (stream) 的平均数量；b) 中曲线显示了 a) 中 4 组星系的平均  $sSFR$  作为连通性的函数，水平线表示给定组中所有星系的平均  $sSFR$ ；c) 中黑色实线表示所有星系在固定质量下的平均连通性。

图 4 a) 平均连通性在星系质量与局部密度平面的分布<sup>[64]</sup>；b) 星系连通性对恒星形成的影响<sup>[64]</sup>；c) SDSS 中按恒星形成活动分类的不同星系群的平均连通性作为恒星质量的函数<sup>[65]</sup>

Kraljic 等人<sup>[65]</sup>研究的恒星形成与不活跃星系的纤维连接度，与 Galárraga-Espinosa 等人<sup>[64]</sup>的相差很大。Kraljic 等人发现不活跃星系的连接度更高 (见图 4c))。Galárraga-Espinosa 等人认为，Kraljic 等人的研究只能说明不同星系所处环境不同，不能很好地解释星系本身的性质如何随环境变化而变化；同时，在模拟分辨率提升下，他们在研究中注重找出细小的纤维结构。两项研究都使用了 DisperSE 算法查找纤维结构；Kraljic 等人输入星系坐标，Galárraga-Espinosa 等人输入暗物质粒子坐标，后者可能更有利于查找细小纤维结构，这是与之前研究的一大区别。

研究暗示的物理图景的合理性仍值得探讨。Bulichi 等人<sup>[68]</sup>通过 Simba 模拟<sup>[69]</sup>发现，虽然靠近纤维中心星系恒星形成活动的变化可以忽略不计，但可用于恒星形成的  $\text{H}_2$  气体增加。Nelson 等人<sup>[70]</sup>指出，暗晕内的气体输运 (即气体从 CGM 进入星系的过程) 受流体动力学模拟数值方案的显著影响。不过，一些观测数据为纤维结构储存冷气体提供了潜在的证据。Kleiner 等人<sup>[71]</sup>对近邻宇宙中靠近纤维主干的星系中性氢含量 (中性氢质量占星系质量的比例) 进行了分析，发现质量较大的星系 (大于  $10^{11} M_\odot$ ) 表现出较高的中性氢含量。Odekon 等人<sup>[72]</sup>利用 ALFAALFA 巡天<sup>[73]</sup>中的中性氢数据，分析了质量范围在  $10^{8.5} M_\odot \sim 10^{10.5} M_\odot$  的恒星

形成星系的中性氢含量,发现位于纤维和簇须环境中星系的中性氢含量要高于空洞中的星系。Sinigaglia 等人<sup>[74]</sup>基于 COSMOS 巡天中的数据,选取了红移为 0.37 处,质量大于  $10^{9.6}M_{\odot}$  的恒星形成星系,发现位于纤维环境星系的中性氢含量显著高于场星系和星系团中的星系。宇宙网结构可能会为中心星系输送冷气体,延缓中心星系在暗晕质量和黑洞反馈等影响下的淬灭过程<sup>[75]</sup>。

## 4 总结与展望

本文回顾了有关宇宙网以及星系在纤维环境中淬灭的研究。DisPerSE、Sconce、MCPM 和基于泊松分布的网络等算法,被用来识别和量化宇宙网结构。尽管在红移 0~1 的观测数据和红移 0~2 的数值模拟中,研究者们找到了纤维附近星系的颜色变红、 $sSFR$  下降、淬灭比例增加等星系形成活动减弱的证据,但是在划分中心与卫星星系、控制包括暗晕质量和局部(星系)密度场等变量后,一些研究表明纤维对恒星形成活动的影响较微弱或存在不确定性。一些研究者提出了不同的观点:纤维可能为附近的星系供应气体并引起  $SFR$  增加。不过,由于数值模拟高度依赖具体方案,对大尺度结构研究中关于气体及恒星形成活动的结果直接进行模拟仍较为困难。

未来的研究可以通过新的数值模拟技术与高红移观测数据,深入研究以下几个问题。

(1) 纤维结构形成机制:在韦布空间望远镜(JWST),大视场观测如 Euclid 任务和未来的广域红外巡天望远镜(Nancy Grace Roman Space Telescope)等高红移观测项目的促进下,研究星系在不同纤维环境中的分布和演化,进一步探索纤维结构的起源和形成机制,研究高红移时刻的宇宙环境。

(2) 纤维环境和星系演化的长期关联:通过大型模拟如 Millennium TNG 等,研究星系在宇宙纤维中的演化过程,探寻不同纤维环境对星系演化的长期影响。

(3) 环境和星系内部恒星形成机制的关联:借助高分辨率模拟,如 FIRE (feedback in realistic environments),探索纤维环境对星系 AGN 反馈、星际周介质中冷气体流动等内部过程的影响,研究宇宙纤维如何通过冷气体输送影响中心星系的恒星形成效率。

### 参考文献:

- [1] Kauffmann G, Fairall A P. MNRAS, 1991, 248: 313
- [2] Platen E, van de Weygaert R, Jones B J T. MNRAS, 2007, 380: 551
- [3] Geller M J, Huchra J P. Science, 1989, 246: 897
- [4] Gott III J R, Jurić M, Schlegel D, et al. ApJ, 2005, 624: 463
- [5] Horvath I, Hakkila J, Bagoly Z. <https://arxiv.org/abs/1311.1104>, 2013
- [6] York D G, Adelman J, Anderson J, John E, et al. AJ, 2000, 120: 1579
- [7] Wang F, Yang J, Hennawi J F, et al. ApJL, 2023, 951: L4
- [8] Laigle C, Pichon C, Arnouts S, et al. MNRAS, 2018, 474: 5437
- [9] Scoville N. From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies ASP Conference Series, USA: National Radio Astronomy Observatory, 2007, 375: 166

- [10] Malavasi N, Arnouts S, Vibert D, et al. *MNRAS*, 2017, 465: 3817
- [11] Kuutma T, Tamm A, Tempel E. *A&A*, 2017, 600: L6
- [12] Salerno J M, Martínez H J, Muriel H. *MNRAS*, 2019, 484: 2
- [13] Libeskind N I, van de Weygaert R, Cautun M, et al. *MNRAS*, 2018, 473: 1195
- [14] Sousbie T, Pichon C, Kawahara H. *MNRAS*, 2011, 414: 384
- [15] Schaap W E, van de Weygaert R. *A&A*, 2000, 363: L29
- [16] Edelsbrunner, Letscher, Zomorodian. *Discrete & computational geometry*, 2002, 28: 511
- [17] Zhang Y, de Souza R S, Chen Y C. *MNRAS*, 2022, 517: 1197
- [18] Hall P, Watson G, Cabrera J. *Biometrika*, 1987, 74: 751
- [19] García-Portugués E. *Journal of Multivariate Analysis*, 2013, 120: 1655
- [20] Jackson J C. *MNRAS*, 1972, 156: 1P
- [21] Burchett J N, Elek O, Tejos N, et al. *ApJL*, 2020, 891: L35
- [22] Jones J. *Artificial life*, 2010, 16: 127
- [23] Adamatzky A. *Physarum machines: computers from slime mould: Vol. 74*. Singapore: World Scientific, 2010: 1
- [24] Simha S, Burchett J N, Prochaska J X, et al. *ApJ*, 2020, 901: 134
- [25] Tempel E, Stoica R S, Martínez V J, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 3465
- [26] Hong S, Dey A. *MNRAS*, 2015, 450: 1999
- [27] Erdős P, Rényi A. *Publ Math Inst Flung Acid*, 1959, 3: 159
- [28] Martínez H J, Muriel H, Coenda V. *MNRAS*, 2016, 455: 127
- [29] Bell E, Balogh M, Gray M, et al. *Spitzer Proposal*, 2004, 142: 3294
- [30] Dressler A. *ApJ*, 1980, 236: 351
- [31] Jaffé Y L, Smith R, Candlish G N, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 1715
- [32] Gunn J E, Gott III J R. *ApJ*, 1972, 176: 1
- [33] Lotz M, Remus R S, Dolag K, et al. *MNRAS*, 2019, 488: 5370
- [34] Annunziatella M, Mercurio A, Biviano A, et al. *A&A*, 2016, 585: A160
- [35] Malavasi N, Langer M, Aghanim N, et al. *A&A*, 2022, 658: A113
- [36] Kraljic K, Arnouts S, Pichon C, et al. *MNRAS*, 2018, 474: 547
- [37] Bluck A F L, Maiolino R, Brownson S, et al. *A&A*, 2022, 659: A160
- [38] Wetzel A R, Tinker J L, Conroy C. *MNRAS*, 2012, 424: 232
- [39] Ahn C P, Alexandroff R, Allende Prieto C, et al. *ApJS*, 2014, 211: 17
- [40] Nelson D, Pillepich A, Springel V, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 624
- [41] Pillepich A, Nelson D, Hernquist L, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 648
- [42] Springel V, Pakmor R, Pillepich A, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 676
- [43] Hasan F, Burchett J N, Abeyta A, et al. *ApJ*, 2023, 950: 114
- [44] Hasan F, Burchett J N, Hellinger D, et al. *ApJ*, 2024, 970: 177
- [45] Franzetti P, Garilli B, Guzzo L, et al. *A&A*, 2014, 566: A100
- [46] Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. *MNRAS*, 2004, 351: 1151
- [47] Sijacki D, Springel V, Di Matteo T, et al. *MNRAS*, 2007, 380: 877
- [48] Feldmann R, Quataert E, Hopkins P F, et al. *MNRAS*, 2017, 470: 1050
- [49] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433: 604
- [50] Johansson P H, Burkert A, Naab T. *ApJL*, 2009, 707: L184
- [51] Balogh M L, Navarro J F, Morris S L. *ApJ*, 2000, 540: 113
- [52] De Propriis R, Colless M, Peacock J A, et al. *MNRAS*, 2004, 351: 125
- [53] Blanton M R, Berlind A A. *ApJ*, 2007, 664: 791
- [54] Weinmann S M, van den Bosch F C, Yang X, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 2
- [55] Kimm T, Somerville R S, Yi S K, et al. *MNRAS*, 2009, 394: 1131
- [56] Birnboim Y, Dekel A. *MNRAS*, 2003, 345: 349
- [57] Lin L, Hsieh B C, Pan H A, et al. *ApJ*, 2019, 872: 50
- [58] Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. *ApJ*, 2015, 798: 7

- [59] Perez N R, Pereyra L A, Coldwell G, et al. MNRAS, 2024, 528: 3186  
[60] O'Kane C J, Kuchner U, Gray M E, et al. MNRAS, 2024, 534: 1682  
[61] Song H, Laigle C, Hwang H S, et al. MNRAS, 2021, 501: 4635  
[62] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. Journal of Machine Learning Research, 2011, 12: 2825  
[63] Goubert P H, Bluck A F L, Piotrowska J M, et al. MNRAS, 2024, 528: 4891  
[64] Galárraga-Espinosa D, Garaldi E, Kauffmann G. A&A, 2023, 671: A160  
[65] Kraljic K, Pichon C, Codis S, et al. MNRAS, 2020, 491: 4294  
[66] Kereš D, Katz N, Weinberg D H, et al. MNRAS, 2005, 363: 2  
[67] Gabor J M, Davé R. MNRAS, 2015, 447: 374  
[68] Bulichi T E, Davé R, Kraljic K. MNRAS, 2024, 529: 2595  
[69] Davé R, Anglés-Alcázar D, Narayanan D, et al. MNRAS, 2019, 486: 2827  
[70] Nelson D, Vogelsberger M, Genel S, et al. MNRAS, 2013, 429: 3353  
[71] Kleiner D, Pimbblet K A, Jones D H, et al. MNRAS, 2017, 466: 4692  
[72] Crone Odekon M, Hallenbeck G, Haynes M P, et al. ApJ, 2018, 852: 142  
[73] Giovanelli R, Haynes M P, Kent B R, et al. AJ, 2005, 130: 2598  
[74] Sinigaglia F, Rodighiero G, Elson E, et al. ApJL, 2022, 935: L13  
[75] Kotecha S, Welker C, Zhou Z, et al. MNRAS, 2022, 512: 926

## Recent Advances in the Study of Effects of Cosmic Filaments on Star Formation Activities

YANG Sirui<sup>1,2</sup>

(1. 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)

**Abstract:** Large-scale structures of galaxies extending scales up to hundreds of parsecs are also known as the cosmic web. These structures are classified into voids, filaments, walls, and nodes based on both geometric features and galaxy number density distributions. Compared with the void environment, galaxies residing in the neighborhood of filaments usually have higher stellar mass and higher fraction of early-type red galaxies. Observations and simulations demonstrate that star formation activity declines as galaxies approach filaments. However, several factors might induce uncertainties: different algorithms result in differences among the reconstructed cosmic web; there are different methods to measure and quantify the geometric properties of filaments; in the vicinity of filaments, the stellar mass, the local galaxy density as well as halo mass are higher, which also induce variations in the star formation activity. Algorithms for finding the cosmic web structures are compared, and when factors such as stellar mass, local galaxy density and halo mass are under controlled, the effects of filaments on star formation are reviewed, with the goal of understanding how star formation is affected by the filament environment.

**Key words:** cosmic filament; galaxy quenching; star formation