

大质量转动沃尔夫-拉叶星的形成 及内部核合成研究*

彭卫国¹⁾ 宋汉峰^{1)2)4)†} 詹琼^{1)‡} 吴兴华¹⁾³⁾ 景江红¹⁾

1) (贵州大学物理学院, 贵阳 550025)

2) (中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

3) (山东大学威海分校空间科学与物理学院, 威海 556011)

4) (日内瓦大学天文系, 日内瓦 1290)

(2019年7月8日收到; 2019年8月12日收到修改稿)

沃尔夫-拉叶 (Wolf-Rayet stars, WR) 星是一类非常特殊的恒星, 具有强烈的星风损失, 造成氢包层丢失, 仅具有裸露的氦核. WR 星被认为是 Ib/Ic 型超新星的前身星, 研究 WR 星的形成及内部核合成具有重要意义. 根据转动恒星的角动量转移和元素扩散方程, 研究了影响 WR 星结构与演化的各种物理因素. 如恒星质量、初始转速、轨道周期、金属丰度等. 大质量、初始转速快和金属丰度高的单星模型, 星风物质损失率大, 易于形成 WR 星. 金属丰度低的恒星由于星风弱, 不容易丢失氢包层, 不容易形成 WR 星. 然而, 快速转动使低金属丰度恒星产生化学成分均匀的演化, 极大地增加了对流核的质量, 相应减小了氢包层厚度, 也可以产生 WR 星. 双星系统中发生洛希瓣物质交换, 将主星大量的氢包层物质转移到次星上, 也可使低金属丰度恒星产生 WR 星. 另外, 洛希瓣物质交换, 减少了氢包层的厚度以及对流核的温度和核反应速率, 主星表面的 ^4He , ^{12}C , ^{19}F , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{25}Mg 等元素的质量丰度高于相同初始条件的单星模型, 而 ^1H , ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne 和 ^{26}Al 等元素的质量丰度却低于单星模型. 总之, 大质量星、初始转速快、金属丰度高、短轨道周期双星系统是形成 WR 星的有利条件.

关键词: 密近双星, 演化, 转动, 潮汐

PACS: 97.80.Fk, 97.10.Cv, 97.10.Kc, 92.60.hh

DOI: 10.7498/aps.68.20191040

1 引言

沃尔夫-拉叶 (Wolf-Rayet stars, WR) 星是一种比较特殊的恒星, 1867年法国天文学家 Wolf 和 Rayet^[1] 发现该类恒星并命名. WR 星与普通大质量恒星不同, 它的光谱中有强的发射线. 这些谱线是由氮、碳、氮等元素所发射的. 根据发

射谱线的不同主要可以分为三大类型, 即含有大量氮元素发射线的 WN 型、含有大量碳元素发射线的 WC 型和含有大量氧元素发射线的 WO 型. 根据恒星的表面温度的不同, WN 型、WC 型 WR 星又可以细分为早型和晚型两种子类, Georgy 等^[2] 详细给出了不同类型 WR 星的判定标准 (见表 1). WR 星的宽发射线是由多普勒展宽形成的, 并且在视线方向上 WR 星周围的气体运动速度约为

* 国家自然科学基金 (批准号: 11463002, 11863003)、贵州省科技计划 (黔科合平台人才)(批准号: [2018]5781) 和中国科学院天体结构与演化重点实验室开放课题 (批准号: OP201405) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hfsong@gzu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhanqiong1108@163.com

300—2400 km/s. 这表明 WR 星正连续不断地将大量物质抛入星际空间, 形成高速运动的星云状包覆层. 由此 WR 星有相当高的星风损失率 $\dot{M} > 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$, 它的氢包层已被剥离, 认为是一种裸露的氦星. 在后期演化时, 它坍缩会形成 Ib/Ic 超新星, 甚至伽马射线暴^[3-5], 因而 WR 星被认为是这些重要天体的前身星. 此外, WR 星会向星际空间抛射大量的核反应产物, 在高金属丰度条件下, 其星风含有大量的碳元素和 ^{26}Al 元素, 由于处于基态的 ^{26}Al 元素衰变成 ^{26}Mg (半衰期 $\tau_{1/2} \simeq 7.2 \times 10^5 \text{ yr}$), 释放出 1.806 MeV 的伽马暴射线, 可以在星系盘周围观测到的伽马暴射线辐射. 另外 WC 星风中大量的 ^{22}Ne , 常用来解释宇宙射线源物质中两种氦的同位素 ($^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$) 的比值. 因此, 研究 WR 星的结构与演化对了解恒星内部核合成与星系化学演化有重要意义.

表 1 WR 星分类的判定依据
Table 1. Criteria for classification of WR stars.

0.45 WR 星的类型	判定依据
O 型星	$\log(T_{\text{eff}}) > 4.5$
WNL 型星	$\log(T_{\text{eff}}) > 4.0$ 和 $X_{\text{H}} < 0.3$
WNE 型星	$X_{\text{H}} < 10^{-5}$ 和 $X_{\text{C}} < X_{\text{N}}$
WNC 型星	$\frac{X_{\text{C}}}{X_{\text{N}}} > 0.1$ 和 $\frac{X_{\text{C}}}{X_{\text{N}}} < 10$
WC 型星	$X_{\text{C}} > X_{\text{N}}$ 和 $\frac{\text{C} + \text{O}}{\text{He}} < 1$
WO 型星	$X_{\text{C}} > X_{\text{N}}$ 和 $\frac{\text{C} + \text{O}}{\text{He}} > 1$

注: T_{eff} 是恒星的有效温度; X_i/X_j 为恒星元素的质量丰度之比; $(\text{C} + \text{O})/\text{He}$ 为数丰度之比.

此外, WR 星也有可能是由于双星系统中的主星洛希瓣物质交换后产生的. 双星演化是形成 WR 星的另一重要途径. 双星系统由于两子星间的相互作用使得两子星的演化特征与单星有明显不同^[6-9]. 近年来人们逐渐认识到转动效应是影响双星结构和演化非常重要的物理因素^[10-14]. 转动使恒星内产生了新的物质运动形式——子午环流、剪切湍流和诸多不稳定. 这些物理过程引起恒星内的化学元素扩散和角动量的转移, 改变氦核的质量和恒星表面碳、氮、氧等元素的丰度, 这对 WR 星形成和演化产生极其重要的影响.

在转动双星中两子星不但受到转动效应的影响并且受到潮汐效应的影响. 潮汐力拉伸每颗子

星产生沿两子星连线方向的隆起^[15-18]. 当子星的自转角速度与公转角速度不同时, 潮汐隆起形成潮汐转矩. 它使自转角速度与公转角速度趋向于一致, 称为潮汐同步和锁定^[19,20]. 在潮汐锁定的短周期系统, 快速转动引起化学元素的强烈转移和混合, 核反应区的氦元素将迅速进入外包层, 产生化学成分均匀演化^[21-23]. 这类恒星的演化与正常的恒星演化是完全不同的. 体现在恒星向高温和高光度的蓝段演化, 恒星半径膨胀得非常缓慢或几乎无变化. 双星间不进行洛希瓣物质交换, 两子星演化成氦星 (或 WR 星), 另外, 快速转动单星也可以形成化学成分均匀的演化^[24-26], 这是形成 WR 星的第三种重要途径.

本文将详细研究形成 WR 星的三种重要途径, 讨论恒星的初始转速、金属丰度、轨道周期等物理因素对 WR 星形成和演化的重要影响. 第 2 节给出了转动恒星的结构方程, 介绍角动量转移和元素扩散方程及边界条件和初始条件、星风物质损失等. 第 3 节用数值方法计算和讨论这几种物理因素对 WR 星结构与演化的影响. 第 4 节给出结论.

2 转动恒星结构方程及角动量转移和元素扩散

2.1 转动恒星结构方程

假设恒星内压强为 P 的等压面包含的体积为 V_P , 表面积为 S_P , 等价的半径定义为 $r_P = \left(\frac{3V_P}{4\pi}\right)^{1/3}$. 转动恒星结构方程可以表示为^[27]

$$\left. \frac{dP}{dM_P} \right|_t = -\frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P, \quad (1)$$

$$\left. \frac{dr_P}{dM_P} \right|_t = \frac{1}{4\pi r_P^2 \bar{\rho}}, \quad (2)$$

$$\left. \frac{dL_P}{dM_P} \right|_t = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_{\nu} + \epsilon_{\text{grav}}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{d \ln T}{dM_P} \right|_t = -\frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P \min \left[\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}} \frac{f_T}{f_P} \right]. \quad (4)$$

方程 (1)—(4) 中, G , c 和 a 分别为引力常量、光速和辐射常数; t 表示恒星演化的某一时刻; M_P , ρ , $\bar{\rho}$ 和 L_P 分别表示恒星等压面所包含的质量、密度、平均密度和通过的能量流 (光度); ϵ , T , P 和

κ 分别为产能率、温度、压强和不透明度; f_T 和 f_P 为转动的动力学效应影响恒星结构的两个修正因子, 可表示为

$$\begin{aligned} f_P &= \frac{4\pi r_P^4}{GM_P S_P} \frac{1}{\langle g_{\text{eff}}^{-1} \rangle}, \\ f_T &= \left(\frac{4\pi r_P^2}{S_P} \right)^2 \frac{1}{\langle g_{\text{eff}} \rangle \langle g_{\text{eff}}^{-1} \rangle}. \end{aligned} \quad (5)$$

重力加速度平均值和其倒数的平均值分别定义为

$$\begin{aligned} \langle g \rangle &= \frac{1}{S_P} \int_{P=\text{constant}} g_{\text{eff}} \mathrm{d}s, \\ \langle g^{-1} \rangle &= \frac{1}{S_P} \int_{P=\text{constant}} g_{\text{eff}}^{-1} \mathrm{d}s, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, S_P 表示等效半径为 r 处的等压面面积, 体积为 V_P . 转动恒星的有效重力加速度可以表示为

$$\mathbf{g}_{\text{eff}} = \left[-\frac{GM}{r^2} + \Omega^2 r \sin^2 \vartheta \right] \mathbf{e}_r + [\Omega^2 r \sin \vartheta \cos \vartheta] \mathbf{e}_\vartheta, \quad (7)$$

式中, ϑ 为余纬度, Ω 为自转角速度.

2.2 元素扩散方程和各种不稳定性造成的元素扩散系数

恒星内部自转激发流体的各种不稳定性, 产生恒星内部的元素混合和角动量转移. Pinsonneault 等 [12] 以及 Endal 和 Sofia [28] 假定各种不稳定性产生的元素混合速率与角动量转移速率成正比, 给出各种不稳定性导致的各种化学元素在径向的扩散方程为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial X_n}{\partial t} \right)_m &= \left(\frac{\partial}{\partial m} \right)_t \left[(4\pi r^2 \rho)^2 D \left(\frac{\partial X_n}{\partial m} \right)_t \right] \\ &+ \left(\frac{\mathrm{d}X_n}{\mathrm{d}t} \right)_{\text{nuc}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, X_n 为某种元素 X_n 的质量丰度; 右边第一项表示扩散效应对化学元素丰度的影响, 右边第二项表示核反应对化学元素丰度的影响. 方程 (8) 的初始条件是各种化学元素分别取它们在零龄主序的初始值. 相应的边界条件为

$$\left(\frac{\partial X_n}{\partial m} \right)_t \Big|_{m=0} = 0 = \left(\frac{\partial X_n}{\partial m} \right)_t \Big|_{m=m(t)}, \quad (9)$$

方程 D 为元素扩散系数, 包括对流和半对流及各种不稳定性对元素扩散的影响, 可以表示为

$$\begin{aligned} D &= D_{\text{conv}} + D_{\text{sem}} + 0.334(D_{\text{SSI}} + D_{\text{DSI}} \\ &+ D_{\text{SHI}} + D_{\text{ES}} + D_{\text{GSF}}), \end{aligned} \quad (10)$$

式中, D_{conv} 为对流不稳定造成的元素扩散系数; D_{sem} 为半对流不稳定产生的元素扩散系数; D_{SSI} 为长期剪切不稳定产生的元素扩散系数; D_{DSI} 为动力学剪切不稳定产生的元素扩散系数; D_{SHI} 为 Solberg-Hoiland 不稳定产生的元素扩散系数; D_{ES} 为子午环流产生的元素扩散系数. 由于转动造成恒星产生变形, 极区温度变高, 赤道区温度变低, 产生热不稳定, 恒星内部形成大尺度子午环流 [29], 是影响恒星内部角动量转移和元素扩散的主要因素; D_{GSF} 为 Goldreich-Schubert-Frike 不稳定产生的元素扩散系数. 这些扩散系数的详细计算参见文献 [30].

2.3 角动量转移方程

由于转动恒星中产生上述不稳定, 造成恒星内部的角动量转移. 角动量转移方程可以写为 [30]

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)_m &= \frac{1}{i} \left(\frac{\partial}{\partial m} \right)_t \left[(4\pi r^2 \rho)^2 i N \left(\frac{\partial \Omega}{\partial m} \right)_t \right] \\ &- \frac{2\Omega}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right)_m \left(\frac{1}{2} \frac{\mathrm{d} \ln i}{\mathrm{d} \ln r} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

式中的 i 是质量坐标为 m 的单位壳层的转动惯量, 设其内半径为 r_i , 外半径为 r_o , 则 $i = 0.4(r_o^5 - r_i^5)/(r_o^3 + r_i^3)$. N 为湍动黏度, 可以写为

$$\begin{aligned} N &= D_{\text{conv}} + D_{\text{sem}} + D_{\text{SSI}} + D_{\text{DSI}} \\ &+ D_{\text{SHI}} + D_{\text{ES}} + D_{\text{GSF}}. \end{aligned} \quad (12)$$

注意在双星系统中潮汐转矩已作用在恒星的外表面, 当作角动量转移方程的外边界条件.

2.4 星风损失率的计算

按照辐射风理论 [31,32], 考虑到金属丰度和多重散射的影响, 他们给出的星风损失公式与恒星质量 M (以 M_\odot 为单位)、恒星光度 L (以 L_\odot 为单位)、有效温度 T_{eff} 、金属丰度 Z 以及星风的收尾速度和逃逸速度的比率 v_∞/v_{esc} 有关, 铁原子电离度的变化对星风损失有重要影响. 铁原子电离度有两个转化温度: 第一有效温度近似为 25000 K, 由电离度 Fe IV 转变为 Fe III; 第二个有效温度近似为 15000 K, 由电离度 Fe III 转变为 Fe II, 因而形成双稳定性跳变 (the bistability jumps), 具体为

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -6.697 + 2.194 \log\left(\frac{L}{10^5}\right) - 1.313 \log\left(\frac{M}{30}\right) \\ & - 1.226 \log\left(\frac{v_\infty/v_{\text{esc}}}{2.0}\right) + 0.993 \log\left(\frac{T_{\text{eff}}}{40000}\right) \\ & - 10.92 \left[\log\left(\frac{T_{\text{eff}}}{40000}\right) \right]^2 + 0.85 \log\left(\frac{Z}{Z_\odot}\right), \\ & T_{\text{eff}} > 25000 \text{ K}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -6.688 + 2.210 \log\left(\frac{L}{10^5}\right) - 1.339 \log\left(\frac{M}{30}\right) \\ & - 1.601 \log\left(\frac{v_\infty/v_{\text{esc}}}{2.0}\right) + 1.07 \log\left(\frac{T_{\text{eff}}}{40000}\right) \\ & + 0.85 \log\left(\frac{Z}{Z_\odot}\right), \\ & 12500 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 22500 \text{ K}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -5.99 + 2.210 \log\left(\frac{L}{10^5}\right) - 1.339 \log\left(\frac{M}{30}\right) \\ & - 1.601 \log\left(\frac{v_\infty/v_{\text{esc}}}{2.0}\right) + 1.07 \log\left(\frac{T_{\text{eff}}}{40000}\right) \\ & + 0.85 \log\left(\frac{Z}{Z_\odot}\right), \quad T_{\text{eff}} < 12500 \text{ K}. \end{aligned} \quad (15)$$

根据 24 颗 WN 型, 18 颗 WC 型和 2 颗 WO, 共 44 颗 WR 星的星风数据, 并考虑了星风的成团效应 [33], 给出 WN 型及 WC 和 WO 型 WR 星的星风损失率公式. 对于 WN 型 WR 星:

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -13.6 + 1.63 \log(L) \\ & + 2.22 \log(Y) + 0.85 \log(Z_{\text{ini}}). \end{aligned} \quad (16)$$

对于 WC 型和 WO 型 WR 星:

当 $Z_{\text{ini}} > 0.002$ 时,

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -8.3 + 0.84 \log(L) + 2.04 \log(Y) \\ & + 1.04 \log(Z) + x_1 \log(Z_{\text{ini}}); \end{aligned} \quad (17)$$

当 $Z_{\text{ini}} < 0.002$ 时,

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -8.3 + 0.84 \log(L) + 2.04 \log(Y) \\ & + 1.04 \log(Z) + x_1 \log\left(\frac{0.002}{Z_\odot}\right) \\ & + x_2 \log(Z_{\text{ini}}). \end{aligned} \quad (18)$$

其中 L 为恒星光度, Y 为 He 的质量丰度, Z 为金属质量分数, Z_{ini} 为恒星的初始金属丰度 (以 Z_\odot 为单位), x_1 和 x_2 取值来自文献 [34].

3 数值计算方法及结果

采用 Paxton 等 [35–37] 编写的 MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) 程序做数值计算. MESA 包括恒星演化过程中所有涉及的核反应网络, 如 PP-I 链、CNO 循环、Ne-Na 循环等. 可以处理低质量恒星的 He 闪耀和大质量星的剧烈核反应等物理过程. 双星系统的洛希瓣物质交换和轨道演化计算见文献 [37]. 主序阶段的星风公式采用文献 [32] 做计算, 而在 WR 星演化阶段采用 Nugis 等 [33] 的星风公式做计算. 各种模型的初始参数列于表 2 中. 初始轨道周期为 3.0 d 的双星模型, 洛希瓣物质交换发生在主序阶段; 而初始轨道周期为 40.0 d 的双星模型, 洛希瓣物质交换发生在氦燃烧阶段. 目的是为了研究不同时期发生的洛希瓣物质交换对 WR 星结构与演化以及内部

表 2 单星和双星理论模型的初始参数
Table 2. Initial parameters for single stars and binaries.

Models	M_1/M_\odot	M_2/M_\odot	Z	α	$P_{\text{orb,ini}}/\text{d}$	$V_{\text{ini},1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\text{ini},2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
S1	60	—	0.014	0.0385	—	0	—
S2	60	—	0.014	0.0385	—	300	—
S3	60	—	0.014	0.0385	—	600	—
S4	40	—	0.014	0.0385	—	300	—
S5	60	—	0.0021	0.0385	—	300	—
S6	60	—	0.0021	0.0385	—	600	—
B1	60	40	0.014	0.0385	3.0	0	0
B2	60	40	0.014	0.0385	3.0	300	300
B3	60	40	0.014	0.0385	3.0	600	600
B4	60	40	0.014	0.0385	40.0	300	300
B5	60	40	0.0021	0.0385	3.0	300	300

注: B 为双星系统, S 为单星; M_1 , M_2 分别为主星和次星的质量 (以太阳质量 M_\odot 为单位); Z 为金属丰度; α 为对流超射系数; $P_{\text{orb,ini}}$ 为双星初始轨道周期; $V_{\text{ini},1}$, $V_{\text{ini},2}$ 分别为主星和次星的初始自转赤道速度.

核合成的影响. 采用 Geogry 等^[2] 研究者对 WR 星的判别和分类依据 (见表 1).

图 1(a) 给出了所有转动单星模型的赤道转动速度演化. 非转动模型 S1 在演化过程中赤道速度保持为零. 比较单星模型 S2 和 S3 (或 S5 和 S6), 发现在主序相同时间间隔内, 初速度快的恒星, 尽管具有较高的初始自转角动量, 但赤道速度下降较快, 这是因为快速转动恒星将损失较多的星风和自转角动量. 这说明快速转动恒星内部由于子午环流和剪切湍流等过程由内向外传输的角动量速度也较快. 比较单星模型 S2 和 S4, 发现初始质量大的恒星速度下降快, 这表明大质量恒星辐射驱动的星风较强, 携带的自转角动量较多. 比较模型 S2 和 S5, 发现低金属丰度恒星在主序阶段速度较高, 这是因为大质量星的星风主要是由 Fe 原子吸收辐射后驱动的, 金属丰度低的恒星 Fe 原子含量少, 星风较弱. 主序后至中心氦开始燃烧, 所有单星模型转动速度小于 40 km/s, 这是由于恒星在赫氏间歇期氢包层剧烈膨胀, 使恒星的转动惯量迅速增加, 因而表面转速降低. 但在中心碳燃烧开始前, 模型 S4 的赤道速度达到 $V_{\text{eq}} = 327 \text{ km/s}$, 这是因为该模型有较厚的表层对流区. 在对流表层厚度锐减的过程中, 自转角动量近似可保持不变, 但壳层转动惯量迅速减少, 自转角速度迅速变大.

图 1(b) 给出了所有转动双星模型中主星的赤道转动速度变化. 非转动模型 B1 在演化过程中赤道速度保持为零. 可以看出, 在双星系统同步过程中 (演化年龄小于 $\sim 0.2 \text{ Myr}$), 模型 B2, B3 和

B5 的转动速度均小于单星 S2 的转动速度. 原因是潮汐转矩对自转角速度大于轨道角速度的子星, 产生潮汐制动效应. 比较模型 B2, B3 和 B5, 发现模型 B2 达到同步的时间最短, 而 B3 达到同步的时间最长. 原因是模型 B3 的初始角速度大, 潮汐转矩将更多的自转角动量转化为轨道角动量, 双星间距变宽, 潮汐转矩变弱, 因而达到同步的时间比较长. 这意味着这 3 个模型在达到同步时, B3 模型的轨道周期最长. 模型 B5 达到同步的时间长于模型 B2, 这是因为模型 B5 的金属丰度低, 恒星半径小, 潮汐同步时标与半径的 7 次方成反比, 同步时标长. 模型 B4 的同步时间最长, 这是因为模型 B4 的初始轨道周期为 40.0 d, 潮汐制动转矩非常小, 与不存在潮汐作用的单星 S3 演化类似. 模型 B2 同步后其速度缓慢增加至物质交换 ($t = 2.6314 \text{ Myr}$) 前, 原因是达到同步后, 恒星半径逐渐增加. 对比模型 B3 和 B5, 发现模型 B3 的轨道周期长, 洛希瓣半径大, 但比模型 B5 更早开始物质交换, 这是因为高金属丰度的恒星半径大, 演化过程膨胀较快达到洛希瓣. 洛希瓣物质交换过程, 造成主星自转角动量大量损失, 物质损失减速转矩大于潮汐加速转矩, 使其表面角速度低于轨道角速度. 物质交换停止后, 潮汐转矩使主星的自转角速度增加, 趋向与轨道角速度一致, 因而赤道速度增加. 在主序后, 恒星演化至 WR 星阶段, 星风损失加剧, 轨道间距增加, 潮汐作用减弱, 恒星损失大量的自转角动量, 其速度逐步减少.

图 2(a) 给出了所有转动单星模型的质量 (实

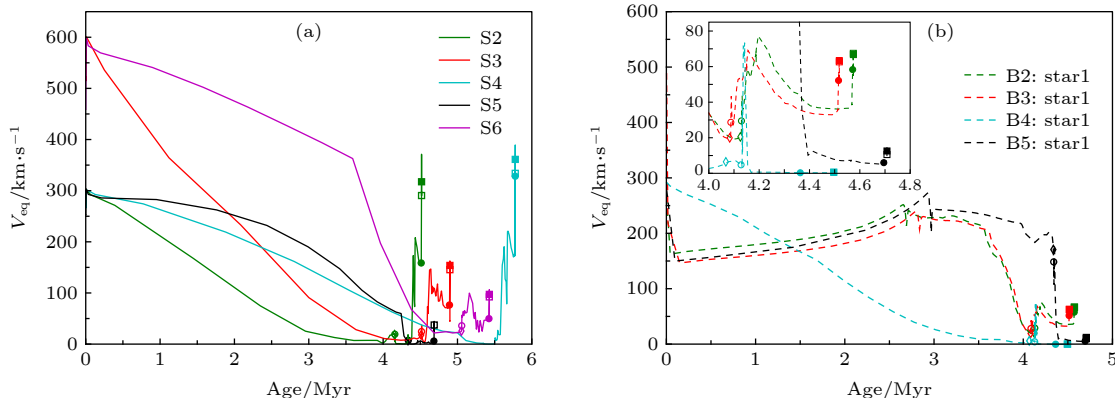


图 1 (a) 单星模型赤道转动速度随时间的变化; (b) 双星模型赤道转动速度随时间的变化; 其中, 空心菱形为主序结束, 空心圆圈为中心氦开始燃烧, 实心圆圈为中心氦燃烧结束, 空心正方形为中心碳开始燃烧, 实心正方形是中心碳燃烧结束

Fig. 1. (a) Variations of equatorial velocity in single star models; (b) variations of equatorial velocity in binary star models. Hollow diamonds denote the end of main sequence; hollow circles stand for the beginning of helium burning; solid circles denote the end of helium burning; hollow squares represent the beginning of carbon burning; solid squares represent the end of carbon burning.

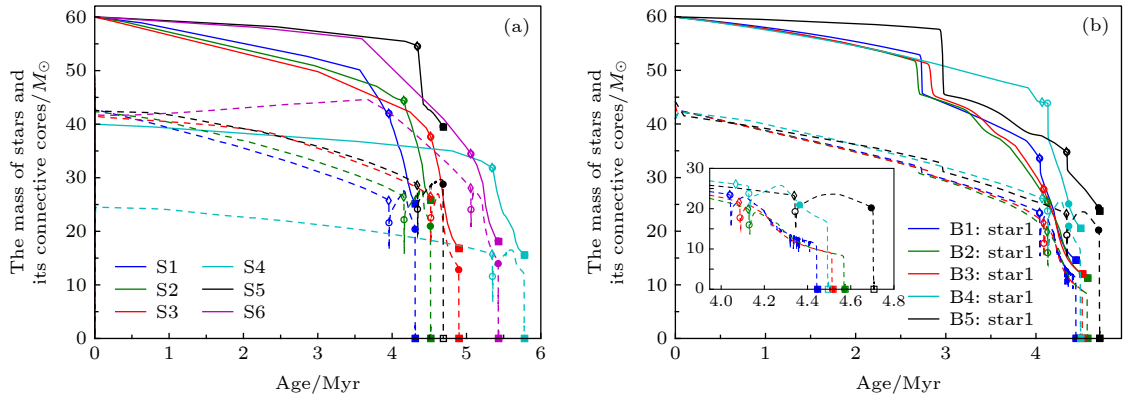


图 2 (a) 各种单星模型的质量 (实线) 和其对应的对流核的质量 (划线) 随着时间的变化; (b) 各种双星模型的质量 (实线) 和其对应的对流核的质量 (划线) 随着时间的变化
 Fig. 2. (a) Stellar mass and its mass of convective core vary with evolutionary time for the models of single star; (b) stellar mass and its mass of convective core vary with evolutionary time for the models of binary star.

线) 和对流核质量 (同颜色的划线) 的变化. 在零龄主序, 从图 2(a) 可看出质量小的模型 S4 对流核最小, 这说明低质量恒星辐射压小将形成低质量的 WR 星. 同时比较模型 S1, S2 和 S3 发现初始速度大的恒星, 对流核较小. 这是因为, 压强梯度和离心力的联合作用与重力平衡, 初始转动快的恒星离心力大, 实质上减小了恒星的有效质量, 对流区减小. 但随着演化发现初始速度大的模型, 质量减小得快, 对流核变大, 这是因为转动减小了重力加速度的约束, 使更多的物质可以逃脱恒星表面. 对流核变大的原因是因为快速转动产生迅速运动的子午环流, 增加了对流核边界元素的混合效率, 减弱了平均分子量梯度的形成, 使对流核边界向外扩大. 然而在主序临近结束时 (TAMS), 发现模型 S1 的质量损失迅速变大 (见表 3), 这是由于非转动模型 S1 经历双稳定性跳变, 引起质量损失大幅度增加. 在零龄主序, 比较模型 S2 和 S5 发现低金属模型 S5 的对流核较大, 这主要是因为低金属丰度模型 S5 中心温度较高造成的. 发现模型 S6 在主序的大部分时间内, 对流核质量不但不收缩, 反而增加. 这是因为快速转动形成化学成分均匀演化 (见图 3(c)). 因而快速转动是形成大质量 WR 星的重要途径. 低金属丰度恒星 S5 比高金属丰度恒星 S2 的主序寿命长 (见表 3), 这与低金属丰度恒星对流核大有密切关系.

图 2(b) 给出了所有转动双星模型的质量 (实线) 和对流核质量 (划线) 的变化. 结果表明, 在主星达到同步后和物质交换开始前, 比较模型 B2 和 S2, 发现模型 B2 的质量较大, 这是因为潮汐同步

过程减小了恒星的转速和离心力, 恒星可以损失较少的质量和角动量. 另外洛希瓣物质交换使恒星质量变小, 对流核也稍稍变小. 对比模型 B2 和 B5, 发现低金属丰度双星模型 B5, 因为弱的星风, 可以保持较高的质量和对流核. 由于长周期模型 B4 的演化与转动单星类似, 因有较高的转动速度, 物质交换又较晚 (物质交换发生在中心氦燃烧阶段), 可以形成较大的氦核和 WR 星.

图 3(a) 给出了所有转动单星模型表面氮丰度随着时间的变化 (其中 $[N/H] = \log(n_N/n_H) + 12$, 为氮元素的相对数丰度). 在主序前阶段, 比较模型 S1, S2 和 S3, 发现不转动的 S1 模型, 表面没有氮增丰. 初始速度越大的恒星, 氮丰度增丰越快, 这表明初始速度快的恒星, 子午环流造成的元素混合时标短. 在主序结束时 (TAMS), 发现非转动模型 S1 的表面氮增丰超过转动模型 S2 (见表 3), 这是因为模型 S1 经历双稳定性跳变 (见图 2(a)), 大量物质被抛射, 氮元素暴露的缘故. 比较模型 S2 和 S5, 发现初始金属丰度低的恒星, 在主序阶段, 恒星表面的氮较低. 这是因为初始金属丰度低的恒星, 经 CNO 循环由 ^{12}C 元素和 ^{16}O 元素转化为 ^{14}N 元素, 达到反应平衡时 ^{14}N 元素总量较少. 在氦燃烧阶段阶段, 除模型 S5 外, 尽管恒星转动速度较低, 所有单星模型的氮增丰非常快. 比如模型 S2 氮丰度由中心氦开始燃烧时的 8.98 dex 增加到氦结束燃烧时的 23.02 dex, 这是因为 WR 星具有强烈的星风损失, 造成氢包层丢失, 逐渐将核反应区的氮暴露.

图 3(b) 给出了所有转动双星模型表面氮丰度

表 3 单星模型在各个演化阶段的参数
Table 3. Parameters for single star at different evolutionary stages.

Sequence	Age/Myr	M/M_{\odot}	$\log T_{\text{eff}}$	$\log(L_1/L_{\odot})$	[N/H]	$V_{\text{eq}}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\log T_c$	$\log \rho_c$
ZAMS								
S1	0.0000	60.00	4.68	5.72	7.84	0.00	7.60	0.31
S2	0.0000	60.00	4.66	5.70	7.84	300.00	7.59	0.29
S3	0.0000	60.00	4.63	5.64	7.84	600.00	7.58	0.26
S4	0.0000	40.00	4.62	5.34	7.84	300.00	7.57	0.40
S5	0.0000	60.00	4.67	5.74	6.99	300.00	7.57	0.24
S6	0.0000	60.00	4.65	5.70	6.99	600.00	7.56	0.21
TAMS								
S1	3.9511	42.02	4.42	5.98	9.01	0.00	7.81	0.91
S2	4.1537	44.42	4.46	6.00	8.96	18.07	7.81	0.90
S3	4.5124	37.75	4.69	5.98	9.29	18.66	7.81	0.92
S4	5.3408	31.87	4.22	5.70	8.63	1.42	7.79	1.00
S5	4.3346	54.56	4.29	6.05	7.96	7.21	7.87	1.05
S6	5.0531	34.52	4.88	5.99	8.96	25.65	7.86	1.10
BCHEB								
S1	3.9550	42.01	4.46	6.00	9.01	0.00	7.98	1.43
S2	4.1574	44.40	4.51	6.02	8.98	19.75	7.98	1.42
S3	4.5162	37.62	4.77	6.01	9.30	25.72	7.98	1.45
S4	5.3453	31.83	4.25	5.72	8.63	1.37	7.96	1.51
S5	4.3383	54.53	4.31	6.06	7.96	7.28	8.03	1.55
S6	5.0570	34.44	4.96	6.02	8.97	36.78	8.03	1.60
ECHEB								
S1	4.3054	25.27	5.21	5.99	23.45	0.00	8.53	3.13
S2	4.5120	25.94	5.21	6.00	23.02	158.64	8.53	3.13
S3	4.8924	16.90	5.20	5.74	24.64	76.49	8.51	3.22
S4	5.7771	15.57	5.35	5.79	25.17	327.58	8.88	4.59
S5	4.6825	39.56	4.45	6.19	8.45	5.98	8.54	3.07
S6	5.4231	18.20	5.21	5.79	28.82	49.92	8.52	3.21
BCCB								
S1	4.3099	25.16	5.33	6.06	16.72	0.00	8.83	4.14
S2	4.5167	25.81	5.34	6.07	19.18	286.44	8.85	4.24
S3	4.8980	16.80	5.34	5.83	20.60	149.13	8.86	4.45
S4	5.7772	15.57	5.36	5.79	25.28	334.92	8.92	4.78
S5	4.6870	39.45	4.46	6.25	8.57	37.32	8.84	4.12
S6	5.4284	18.10	5.34	5.87	20.66	94.78	8.85	4.35
ECCB								
S1	4.3100	25.15	5.42	6.09	18.59	0.00	9.07	5.25
S2	4.5167	25.81	5.42	6.10	18.47	313.57	9.06	5.19
S3	4.8981	16.80	5.41	5.86	20.55	157.94	9.06	5.40
S4	5.7772	15.57	5.40	5.81	25.43	367.73	9.03	5.33
S5	—	—	—	—	—	—	—	—
S6	5.4285	18.10	5.41	5.90	20.90	97.57	9.05	5.34

注: ZAMS为零龄主序; TAMS表示主序结束; BCHEB为中心氦核开始燃烧; ECHEB为中心氦核结束燃烧; BCCB 为中心碳核开始燃烧; CCB为中心碳核结束燃烧.

随着时间的变化. 实线表示双星系统的主星, 划线表示双星系统的次星 ^{14}N 的表面丰度. 在物质交换前, 比较模型 S2 和 B2, 发现恒星在双星系统中氮增丰较小, 这是因为潮汐同步过程降低恒星的转动速度, 使子午环流速度减慢, 混合时标变长. 模型 B4 的氮增丰最显著, 因为它潮汐转矩小, 与转动模型 S2 类似. 对比模型 B2 的主星 (实线) 和次星 (划线), 发现主星 ^{14}N 表面氮增丰比次星显著, 这是因为子午环流的速度与辐射压成正比, 质量大的恒星子午环流较快. 在所有双星模型中, 物质交换开始后 (见表 4), 所有主星和次星表面的氮丰度增加. 这是因为洛希瓣物质交换, 逐渐暴露了主星核反应区产生的 ^{14}N . 另外主星表面富氮元素物质转移到次星表面使次星表面氮元素增丰. 物质交换后, 星风继续丢失主星的氢包层, 使富含氮元素的物质不断暴露, 因而氮丰度逐渐升高. 而次星在物质交换后, 由于吸积物质的平均分子量高于底部, 热盐混合效应逐渐沉积表面的富氮物质, 使其表面

氮丰度降低. 第二次物质交换也出现类似行为.

表 4 列出了所有双星模型在各个阶段的演化参数. 从零龄主序 (ZAMS) 到开始第一次物质交换 (BTM1) 前. 比较模型 B1, B2 和 B3 的轨道周期变化, 发现快速自转使系统轨道周期变大, 这与潮汐同步过程造成的自转角动量转变为轨道角动量有关. 发现模型 B4 的轨道周期从 40.0 d 增加到 63.17 d, 这主要因为星风物质损失使双星系统轨道间距变宽. 从第一、二次洛希瓣物质交换开始到物质交换结束, 模型 B1, B2 和 B3 主星表面的有效温度增加, 次星的光度增加. 这是因为洛希瓣物质交换逐渐暴露了主星表面的高温物质, 并将其转移到次星表面. 次星由于吸积富氮物质, 对流核变大, 不透明度减少, 显示高光度. 另外, 洛希瓣物质交换使主星的赤道速度变低, 次星的赤道速度变大, 这是因为物质交换减小了主星表面的自转角动量, 并且将一部分轨道角动量转变为次星的自转角动量. 另外, 两次洛希瓣物质交换均使主星中心温

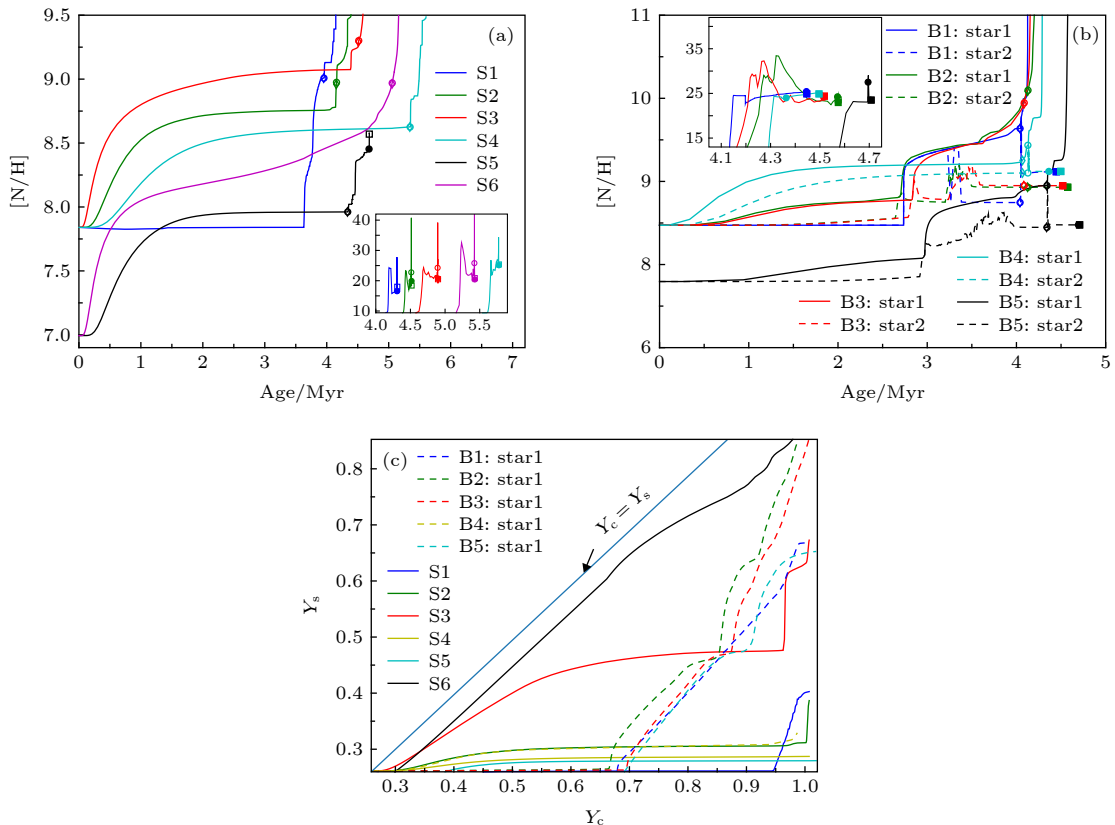


图 3 (a) 单星模型中恒星表面氮丰度随时间的演化; (b) 双星模型中两子星表面氮丰度随时间的演化; (c) 主序阶段, 单星和双星模型的表面氦质量丰度随中心氦质量丰度的变化

Fig. 3. (a) Surface nitrogen abundance vary with evolutionary time for the models of single star; (b) surface nitrogen abundance vary with evolutionary time for the models of binary star; (c) surface helium abundance vary with central helium for the models of single stars and binary star.

表 4 双星模型在各个主要演化阶段的参数
Table 4. Evolutionary parameters for binary star at different stages.

Sequence	Age /Myr	P_{orb} /d	M_1/M_{\odot}	M_2/M_{\odot}	$\log(T_{\text{eff},1})$ /K	$\log\left(\frac{L_1}{L_{\odot}}\right)$	$\log(T_{\text{eff},2})$ /K	$\log\left(\frac{L_2}{L_{\odot}}\right)$	$\left[\frac{N_1}{H}\right]$	$\left[\frac{N_2}{H}\right]$	$V_{\text{eq}1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\text{eq}2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\log T_c/\text{K}$	$\log \rho_c/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ZAMS														
B1	0.0000	3.00	60.00	40.00	4.68	5.71	4.64	5.36	7.84	7.84	0.00	0.00	7.62	0.37
B2	0.0000	3.00	60.00	40.00	4.67	5.70	4.63	5.34	7.84	7.84	288.35	294.86	7.61	0.35
B3	0.0000	3.00	60.00	40.00	4.64	5.65	4.59	5.27	7.84	7.84	566.93	581.75	7.60	0.32
B4	0.0000	40.00	60.00	40.00	4.67	5.70	4.63	5.34	7.84	7.84	288.35	294.86	7.61	0.35
B5	0.0000	3.00	60.00	40.00	4.69	5.66	4.65	5.29	6.99	6.99	306.83	301.14	7.66	0.50
BTM1														
B1	2.6862	3.60	53.01	38.15	4.59	5.84	4.59	5.48	7.84	7.84	0.00	0.00	7.64	0.39
B2	2.6314	3.63	51.90	38.00	4.59	5.82	4.59	5.47	8.25	7.94	250.24	162.73	7.63	0.39
B3	2.7810	4.12	51.34	37.86	4.57	5.83	4.59	5.48	8.22	7.96	238.80	146.79	7.64	0.40
B4	4.1328	63.17	43.82	35.94	4.23	6.02	4.49	5.56	9.05	8.69	35.18	120.39	8.24	2.26
B5	2.9131	3.25	57.69	39.46	4.60	5.86	4.61	5.47	7.34	7.07	270.95	164.95	7.68	0.52
ETM1														
B1	3.8956	4.25	36.84	43.77	4.62	5.90	4.57	5.67	9.20	8.18	0.00	0.00	7.70	0.61
B2	2.7305	3.41	45.44	43.82	4.60	5.78	4.61	5.57	8.66	8.26	239.26	177.55	7.63	0.42
B3	2.9777	3.92	44.57	43.27	4.59	5.81	4.60	5.58	8.83	8.25	226.58	161.96	7.64	0.44
B4	4.1426	65.47	36.94	36.00	4.27	6.10	4.49	5.56	9.26	8.67	73.07	330.19	8.31	2.47
B5	3.9817	3.61	38.02	51.22	4.63	5.87	4.65	5.73	8.27	7.82	217.02	168.84	7.72	0.69
TAMS														
B1	4.0397	4.65	33.60	43.48	4.68	5.91	4.56	5.68	9.30	8.18	0.00	0.00	7.81	0.95
B2	4.1254	5.13	25.57	43.47	4.83	5.79	4.53	5.69	9.86	8.41	20.52	193.13	7.80	0.99
B3	4.0832	5.43	27.93	43.40	4.81	5.84	4.54	5.68	9.66	8.44	19.99	174.17	7.80	0.97
B4	4.0693	62.61	44.06	36.03	4.41	5.97	4.54	5.56	8.82	8.63	6.63	68.60	7.72	0.65
B5	4.3382	3.81	34.79	50.91	4.68	5.92	4.63	5.75	8.44	7.81	169.76	181.54	7.86	1.10
BCHEB														
B1	4.0409	4.65	33.57	43.48	4.69	5.91	4.56	5.68	9.30	8.18	0.00	0.00	7.82	0.99
B2	4.1297	5.15	25.44	43.46	4.92	5.82	4.53	5.69	9.87	8.41	30.07	192.49	7.97	1.52
B3	4.0874	5.45	27.80	43.39	4.90	5.87	4.54	5.68	9.68	8.44	29.48	173.40	7.98	1.50
B4	4.1281	63.03	43.88	35.95	4.48	5.99	4.53	5.56	9.04	8.63	4.75	60.68	7.91	1.21
B5	4.3422	3.82	34.74	50.91	4.75	5.94	4.63	5.76	8.44	7.81	149.04	181.17	8.02	1.60
BMT2														
B1	4.0474	4.67	33.39	43.47	4.63	6.00	4.58	5.69	9.30	9.30	0.00	0.00	8.24	2.29
B2	3.1581	3.55	43.04	43.10	4.61	5.81	4.59	5.59	8.99	8.19	231.13	191.20	7.64	0.45
B3	3.1290	3.97	43.65	43.04	4.59	5.82	4.59	5.58	8.93	8.23	223.55	166.73	7.64	0.45
B4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B5	4.3460	3.84	34.70	50.90	4.66	5.99	4.63	5.76	8.44	7.81	187.54	180.93	8.26	2.34
EMT2														
B1	4.0562	5.13	30.44	45.39	4.65	6.06	4.62	5.72	9.48	8.74	0.00	0.00	8.31	2.49
B2	3.5409	3.78	37.67	44.95	4.61	5.82	4.59	5.65	9.06	8.42	212.81	195.54	7.66	0.51
B3	3.6151	4.27	37.66	44.50	4.60	5.84	4.58	5.65	9.07	8.44	203.84	175.46	7.66	0.52
B4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B5	4.3517	4.25	31.33	51.54	4.67	6.05	4.64	5.77	8.60	7.91	174.27	292.23	8.31	2.49

表 4 (续) 双星模型在各个主要演化阶段的参数
Table 4 (continued). Evolutionary parameters for binary star at different stages.

Sequence	Age /Myr	P_{orb} /d	M_1/M_{\odot}	M_2/M_{\odot}	$\log(T_{\text{eff},1})$ /K	$\log\left(\frac{L_1}{L_{\odot}}\right)$	$\log(T_{\text{eff},2})$ /K	$\log\left(\frac{L_2}{L_{\odot}}\right)$	$\left[\frac{\text{N}_1}{\text{H}}\right]$	$\left[\frac{\text{N}_2}{\text{H}}\right]$	$V_{\text{eq}1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\text{eq}2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\log T_c/\text{K}$	$\log \rho_c/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ECHEB														
B1	4.4454	8.50	14.60	44.32	5.30	5.71	4.57	5.75	25.43	8.65	0.00	0.00	8.74	3.96
B2	4.5716	8.31	11.27	42.40	5.27	5.52	4.45	5.73	24.26	8.41	58.94	181.80	8.70	3.93
B3	4.5155	9.20	12.05	42.46	5.27	5.56	4.47	5.71	24.15	8.44	52.74	142.55	8.68	3.83
B4	4.3645	94.44	25.01	35.66	5.14	5.92	4.50	5.58	24.02	8.65	0.32	127.17	8.37	2.68
B5	4.6953	5.16	24.36	51.19	5.18	5.95	4.61	5.80	27.78	7.85	6.01	149.71	8.48	2.99
BCCB														
B1	4.4468	8.51	14.58	44.31	5.35	5.75	4.57	5.75	24.91	8.65	0.00	0.00	8.89	4.66
B2	4.5741	8.32	11.24	42.40	5.33	5.58	4.45	5.73	23.39	8.41	67.64	179.57	8.85	4.60
B3	4.5184	9.22	12.02	42.45	5.34	5.62	4.47	5.71	24.42	8.44	62.74	140.22	8.88	4.71
B4	4.4963	110.76	20.53	35.48	5.36	5.95	4.48	5.59	24.89	8.65	0.56	99.94	8.90	4.56
B5	4.7078	5.25	23.75	51.18	5.37	6.03	4.61	5.80	23.51	7.85	10.68	146.97	8.92	4.63
ECCB														
B1	4.4469	8.51	14.58	44.31	5.41	5.77	4.57	5.75	24.88	8.65	0.00	0.00	9.04	5.38
B2	4.5743	8.32	11.24	42.40	5.37	5.60	4.45	5.73	22.95	8.41	66.77	173.97	9.01	5.44
B3	4.5185	9.22	12.01	42.45	5.38	5.64	4.47	5.71	24.41	8.44	63.39	136.75	9.01	5.41
B4	4.4963	110.77	20.53	35.48	5.42	5.97	4.48	5.59	24.88	8.65	0.67	98.21	9.05	5.22
B5	4.7078	5.25	23.75	51.18	5.42	6.04	4.61	5.80	23.50	7.85	12.57	144.92	9.05	5.18

度和密度增加. 比较单星模型 S1 在主序结束的年龄 ($t = 3.95$ Myr) 和双星模型 B1 中的主星在主序结束的年龄 ($t = 4.04$ Myr), 发现洛希瓣物质交换减小了中心温度, 却延长了恒星在主序的寿命. 在 WR 星阶段, 强大的星风物质和洛希瓣物质交换的联合作用, 使模型 B1, B2, B3 的主星的氮丰度有强烈增丰 (见表 4). 在中心氮燃烧结束, 比较 B2 和 B4 两个模型, 发现低金属丰度恒星由于具有较高的质量 (星风弱), 使中心温度和密度减小. 模型 B5 表面的氮增丰最大, 达到 27.78 dex, 这主要是因为低金属丰度模型 B5, 氮核和氢燃烧壳层间距窄. 由于潮汐锁定, 在中心氮燃烧阶段转动速度较高 (平均速度约为 100 km/s) 中心氮燃烧产生的碳元素, 通过转动混合进入氢燃烧壳层, 将碳元素转变为氮元素的缘故 [38].

图 3(c) 给出了所有单星和双星模型中的主星表面氮丰度随中心氮的变化趋势. 在主序前期单星模型 S2 的氮增丰比氦增丰显著, 这是因为 CN 循环进行得非常快, ^{14}N 元素产生迅速, 在恒星核和包层间形成较高的氮元素丰度梯度, 容易产生扩散. 可以看到模型 S6 的斜率接近于 1, 这表明中心的氮和恒星表面的氮几乎一致. 原因是低金属丰度

恒星, 星风非常弱, 损失非常少的自转角动量, 可以保持较高的转动速度. 快速转动使大质量星的元素混合时标短于核反应时标, 恒星内部不形成化学分子量梯度, 恒星内部核反应区产生的氮通过转动混合效应扩散至恒星表面, 同时包层的氢元素迅速进入核反应区, 使模型 S6 经历化学成分均匀演化. 这样的恒星膨胀非常缓慢, 如处在双星系统内将不经历洛希瓣物质交换. 主序后恒星半径反而收缩, 因而这是形成大质量氮星的另一主要途径. 可以看出, 双星模型 B2 和 B3 在中心氮质量丰度大于 0.6 时, 氮增丰迅速甚至超过同类型单星, 这是因为洛希瓣物质交换将氢包层除去, 氮元素暴露的缘故. 模型 B4 氮增丰明显低于其他双星模型, 这是因为洛希瓣物质交流发生在主序后.

图 4 给出了所有单星和双星模型中的主星表面各种元素的质量丰度随恒星质量的变化趋势. 对比模型 S1 和 S6, 发现主序阶段快速转动对恒星表面的丰度改变比较明显, 模型 S6 表面的 ^1H , ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{25}Mg 和 ^{19}F 的质量丰度下降. 这说明子午环流将这些元素传输到核反应区, 使这些元素丰度下降 (见表 5). 在核反应区, ^1H , ^{12}C 和 ^{16}O 通过 CNO 循环转化成 ^4He , ^{14}N ; ^{22}Ne , ^{25}Mg , ^{19}F 等通过

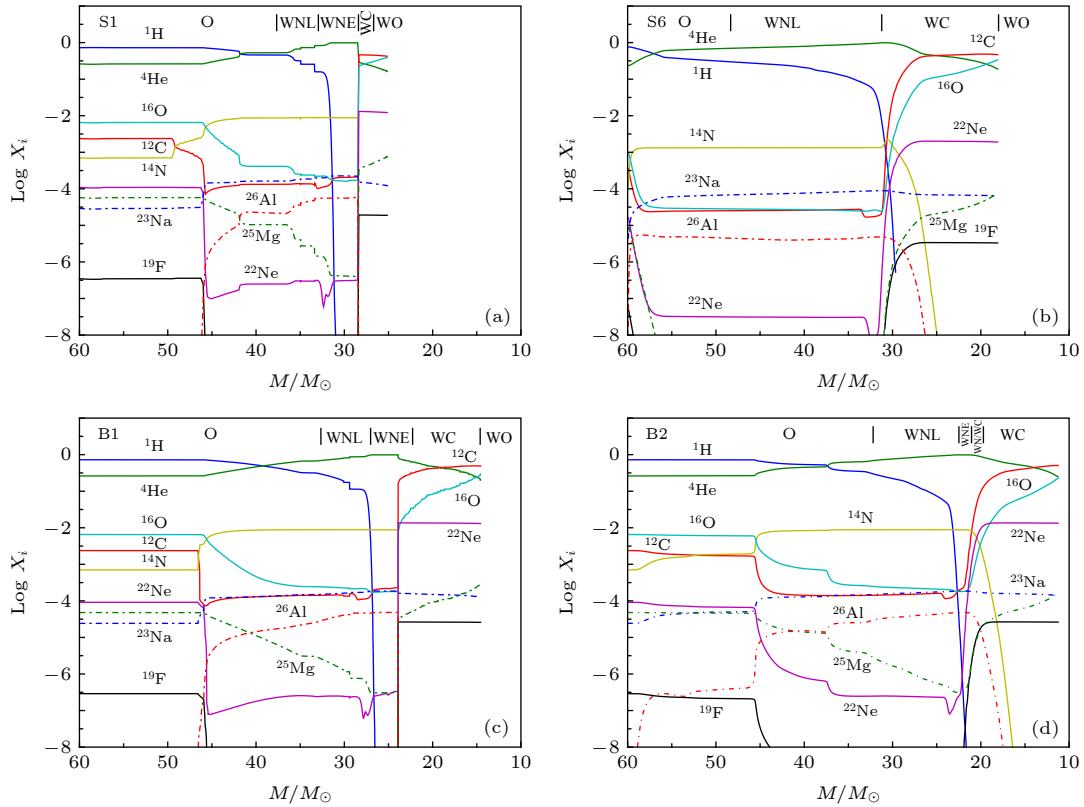


图 4 (a) 单星非转动 S1 模型表面各种元素的质量丰度的对数值随时间的演化; (b) 单星转动 S6 模型表面各种元素的质量丰度的对数值随时间的演化; (c) 双星非转动 B1 模型中的主星表面各种元素的质量丰度的对数值随时间的演化; (d) 双星转动模型 B2 中的主星表面各种元素的质量丰度的对数值随时间的演化

Fig. 4. (a) Evolution as a function of the actual mass of the abundances (in mass fraction) of different elements at the surface of a non-rotating single model S1; (b) evolution as a function of the actual mass of the abundances (in mass fraction) of different elements at the surface of a rotating single model S6; (c) evolution as a function of the actual mass of the abundances (in mass fraction) of different elements at the surface of the primary star of model B1; (d) evolution as a function of the actual mass of the abundances (in mass fraction) of different elements at the surface of the primary star of model B2.

俘获质子分别变为 ^{23}Na , ^{26}Al , ^{16}O . 核反应区的 ^4He , ^{14}N , ^{23}Na , ^{26}Al 等元素通过转动混合效应传输到恒星表面, 使这些元素的表面丰度上升. 在 WR 星阶段, ^1H , ^{14}N , ^{26}Al 的质量丰度下降. ^{26}Al 元素通过 β (半衰期 0.716 Myr) 衰变放出 1.806 MeV 的 γ 射线, 因而 ^{26}Al 的质量丰度下降 (见表 5); 另外, ^{26}Al 的质量丰度下降的原因也可能是由于俘获 ^{22}Ne 产生的中子变成 ^{26}Mg . 同时 ^{12}C , ^{16}O , ^{19}F , ^{22}Ne 等质量丰度增加. 这说明在氦燃烧阶段, 氦元素转成了 ^{12}C 和 ^{16}O , ^{14}N 转化成 ^{19}F 和 ^{22}Ne . 氦燃烧只产生小部分的 ^{20}Ne , 大部分 ^{20}Ne 是在中心碳燃烧产生的. ^{20}Ne 丰度变化也表明在这个阶段产生了 α 族元素. 这些计算结果可以解释, WR 星星风中 含有较高的 ^{26}Al , ^{19}F 质量丰度, 较高的氦同位素比值 ^{22}Ne 等观测事实.

表 5 和表 6 列出了本文典型模型恒星表面的

各种元素丰度随时间的演化 (主要是为方便比较图 4 的各元素质量丰度在恒星表面的值). 结果表明化学成分均匀演化模型 S6 WNL 阶段开始在氢燃烧结束前, 而模型 S1 和 S2 WNL 阶段开始在中心氦燃烧后. 说明化学均匀演化模型可以经历较长的 WR 星演化阶段. 转动模型 S2 和 S6 不经历 WNE 阶段, 因为当这两个模型表面氢的质量丰度小于 10^{-5} 时, 碳质量丰度已经大于氮质量丰度. 表 6 展示了双星模型 B2 的 WNL 阶段发生在主序阶段, 这与洛希瓣物质交换损失氢包层, 提前进入 WR 阶段有关. 另外, 模型 B2 没有经历 WO 演化阶段, 这是因为该模型在 WC 后期恒星质量小 (对比模型 B1)、中心温度低、表面氦质量丰度高、氧质量丰度低造成的. 在中心氦燃烧结束, 比较模型 S1 和 B1 (对比表 5 和表 6), 发现双星模型的 ^4He , ^{12}C , ^{19}F , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{25}Mg 的质量丰度高于相同初

表 5 单星模型 S1, S2 和 S6 在各个主要阶段恒星表面的各种元素的质量丰度
Table 5. Mass fraction of various chemical elements at stellar surfaces at different stages in models S1, S2, and S6.

Sequence	Age/Myr	M_1/M_\odot	$\log(X_{1\text{H}})$	$\log(X_{4\text{He}})$	$\log(X_{12\text{C}})$	$\log(X_{14\text{N}})$	$\log(X_{16\text{O}})$	$\log(X_{19\text{F}})$	$\log(X_{20\text{Ne}})$	$\log(X_{22\text{Ne}})$	$X_{26\text{Al}}$
ZAMS											
S1	0.0000	60.00	-0.14	-0.58	-2.62	-3.15	-2.18	-6.46	-2.87	-3.96	0
S2	0.0000	60.00	-0.14	-0.58	-2.62	-3.15	-2.18	-6.46	-2.87	-3.96	0
S6	0.0000	60.00	-0.12	-0.63	-3.45	-3.98	-3.01	-7.28	-3.69	-4.78	0
TAMS											
S1	3.9511	42.02	-0.23	-0.40	-3.91	-2.08	-3.07	-9.23	-2.87	-6.77	9.77×10^{-6}
S2	4.1537	44.42	-0.22	-0.42	-3.70	-2.11	-2.86	-7.86	-2.87	-5.37	4.57×10^{-6}
S6	5.0531	34.52	-0.99	-0.05	-4.56	-2.88	-4.60	-10.46	-3.83	-7.51	4.36×10^{-6}
BCHEB											
S1	3.9550	42.01	-0.23	-0.40	-3.91	-2.08	-3.07	-9.23	-2.87	-6.77	9.77×10^{-6}
S2	4.1574	44.40	-0.22	-0.41	-3.77	-2.10	-2.91	-8.07	-2.87	-5.58	4.89×10^{-6}
S6	5.0570	34.44	-0.99	-0.05	-4.56	-2.88	-4.60	-10.46	-3.83	-7.51	4.36×10^{-6}
WNL											
S1	4.1147	34.94	-0.58	-0.14	-3.87	-2.06	-3.63	-9.72	-2.88	-6.53	4.16×10^{-5}
S2	4.3343	36.29	-0.57	-0.14	-3.82	-2.06	-3.59	-9.67	-2.88	-6.45	3.54×10^{-5}
S6	4.1796	48.34	-0.52	-0.16	-4.60	-2.88	-4.55	-10.50	-3.79	-7.50	4.46×10^{-6}
WNE											
S1	4.1801	31.26	-5.02	-0.01	-3.73	-2.05	-3.77	-9.61	-2.89	-6.56	5.62×10^{-5}
S2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WC											
S1	4.2217	28.36	-21.87	-0.51	-0.34	-17.12	-0.68	-4.71	-2.80	-1.88	1.12×10^{-15}
S2	4.4173	30.79	-5.22	-0.02	-1.50	-2.06	-2.05	-5.72	-2.89	-2.91	4.67×10^{-5}
S6	5.2107	29.81	-5.80	-0.02	-1.37	-2.89	-2.52	-6.15	-3.84	-3.38	3.80×10^{-6}
WO											
S1	4.2569	26.70	-21.35	-0.65	-0.34	-16.95	-0.52	-4.72	-2.70	-1.89	2.57×10^{-15}
S2	4.4302	28.58	-17.68	-0.71	-0.36	-5.17	-0.45	-4.72	-2.63	-1.91	4.16×10^{-8}
S6	5.3898	18.84	-29.68	-0.64	-0.32	-17.99	-0.55	-5.48	-3.51	-2.71	8.51×10^{-17}
ECHEB											
S1	4.3054	25.27	-29.41	-0.77	-0.37	-16.81	-0.41	-4.72	-2.59	-1.91	5.01×10^{-15}
S2	4.5120	25.94	-28.78	-0.82	-0.39	-16.61	-0.38	-4.72	-2.54	-1.93	7.07×10^{-15}
S6	5.4231	18.20	-35.90	-0.71	-0.33	-17.93	-0.48	-5.48	-3.43	-2.72	1.14×10^{-16}
BCCB											
S1	4.3099	25.16	-22.67	-0.79	-0.37	-16.80	-0.40	-4.73	-2.58	-1.92	5.37×10^{-15}
S2	4.5167	25.81	-24.97	-0.83	-0.40	-16.64	-0.37	-4.72	-2.52	-1.93	7.58×10^{-15}
S6	5.4284	18.10	-27.74	-0.72	-0.33	-17.93	-0.47	-5.48	-3.41	-2.72	1.54×10^{-16}
ECCB											
S1	4.3100	25.15	-24.54	-0.79	-0.37	-16.80	-0.40	-4.73	-2.58	-1.92	5.37×10^{-15}
S2	4.5167	25.81	-24.26	-0.83	-0.40	-16.64	-0.37	-4.72	-2.52	-1.93	7.76×10^{-15}
S6	5.4285	18.10	-27.99	-0.72	-0.33	-17.93	-0.47	-5.48	-3.41	-2.72	1.54×10^{-16}

始条件的单星模型, 而 ^1H , ^{14}N , ^{16}O , ^{22}Ne 和 ^{26}Al 质量丰度下降, 这与双星演化经历洛希瓣物质交换,

减小了恒星内部的温度和核反应速率有密切关系.

图 5 给出了所有双星模型中的洛希瓣物质交

表 6 双星模型 B1 和 B2 在各个主要阶段主星表面的各种元素的质量丰度的对数值

Table 6. Mass fraction of various chemical elements at the surfaces of the primary star at different stages in models B1 and B2.

Sequence	Age/Myr	M_1/M_\odot	$\log(X_{\text{H}})$	$\log(X_{\text{He}})$	$\log(X_{\text{C}})$	$\log(X_{\text{N}})$	$\log(X_{\text{O}})$	$\log(X_{\text{F}})$	$\log(X_{\text{Ne}})$	$\log(X_{\text{Ne}})$	X_{Al}
ZAMS											
B1	0.0000	60.00	-0.14	-0.58	-2.62	-3.15	-2.18	-6.46	-2.87	-3.96	0
B2	0.0000	60.00	-0.14	-0.58	-2.62	-3.15	-2.18	-6.46	-2.87	-3.96	0
BTM1											
B1	2.6862	53.01	-0.14	-0.58	-2.62	-3.15	-2.18	-6.54	-2.95	-4.04	3.31×10^{21}
B2	2.6314	51.90	-0.14	-0.58	-2.76	-2.74	-2.21	-6.66	-2.95	-4.16	3.38×10^{-7}
ETM1											
B1	3.8956	36.84	-0.40	-0.23	-3.87	-2.06	-3.56	-9.69	-2.96	-6.62	1.81×10^{-5}
B2	2.7305	45.44	-0.16	-0.53	-3.02	-2.36	-2.38	-6.94	-2.95	-4.45	3.89×10^{-6}
ECHB											
B1	4.0397	33.60	-0.50	-0.18	-3.85	-2.05	-3.61	-9.72	-2.96	-6.61	2.45×10^{-5}
B2	4.1254	25.57	-1.06	-0.05	-3.80	-2.05	-3.67	-9.68	-2.96	-6.63	4.16×10^{-5}
BCHEB											
B1	4.0409	33.57	-0.50	-0.18	-3.85	-2.05	-3.61	-9.72	-2.96	-6.61	2.45×10^{-5}
B2	4.1297	25.44	-1.07	-0.05	-3.80	-2.05	-3.67	-9.68	-2.96	-6.63	4.16×10^{-5}
BMT2											
B1	4.0474	33.39	-0.50	-0.18	-3.85	-2.05	-3.61	-9.72	-2.96	-6.61	2.51×10^{-5}
B2	3.1581	43.04	-0.24	-0.39	-3.80	-2.09	-2.95	-8.24	-2.95	-5.76	1.31×10^{-5}
WNL											
B1	4.0480	32.78	-0.52	-0.16	-3.85	-2.05	-3.61	-9.73	-2.96	-6.62	2.81×10^{-5}
B2	3.8633	32.25	-0.52	-0.16	-3.85	-2.05	-3.61	-9.72	-2.96	-6.60	2.95×10^{-5}
EMT2											
B1	4.0562	30.44	-0.68	-0.11	-3.84	-2.05	-3.64	-9.72	-2.96	-6.60	3.89×10^{-5}
B2	3.5409	37.67	-0.28	-0.34	-3.86	-2.07	-3.16	-8.72	-2.95	-6.19	1.41×10^{-5}
WNE											
B1	4.1344	26.76	-5.00	-0.01	-3.73	-2.05	-3.76	-9.59	-2.97	-6.65	4.78×10^{-5}
B2	4.2129	22.30	-5.18	-0.01	-3.68	-2.06	-3.74	-9.45	-2.97	-6.52	4.78×10^{-5}
WC											
B1	4.1976	23.92	-28.45	-0.09	-0.80	-14.82	-2.17	-4.58	-2.97	-1.87	6.45×10^{-17}
B2	4.2498	21.01	-10.94	-0.01	-2.05	-2.10	-3.40	-5.62	-2.97	-2.91	4.36×10^{-5}
WO											
B1	4.4339	14.75	-31.67	-0.64	-0.31	-17.28	-0.58	-4.59	-2.85	-1.88	5.62×10^{-5}
B2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ECHEB											
B1	4.4454	14.60	-31.77	-0.70	-0.31	-17.19	-0.53	-4.59	-2.82	-1.89	7.76×10^{-16}
B2	4.5716	11.27	-30.86	-0.60	-0.30	-17.45	-0.65	-4.58	-2.90	-1.88	2.45×10^{-16}
BCCB											
B1	4.4468	14.58	-31.25	-0.70	-0.31	-17.19	-0.53	-4.59	-2.82	-1.89	7.76×10^{-16}
B2	4.5741	11.24	-29.98	-0.61	-0.30	-17.44	-0.64	-4.58	-2.90	-1.88	2.51×10^{-16}
ECCB											
B1	4.4469	14.58	-31.22	-0.70	-0.31	-17.19	-0.53	-4.59	-2.82	-1.89	7.76×10^{-16}
B2	4.5743	11.24	-29.54	-0.61	-0.30	-17.44	-0.64	-4.58	-2.90	-1.88	2.51×10^{-16}

换速率恒星质量的变化趋势. 可以看出, 模型 B2 的物质交换最先开始, 这与模型 B2 中主星的半径首先达到洛希瓣半径有关. 由于转动的动力学效应, 模型 B2 的主星半径大于模型 B1 的主星半径, 物质交换先开始. 模型 B3 的初始速度大, 有更多的自转角动量转移到轨道角动量, 双星间距变得更宽, 洛希瓣半径大于模型 B2, 物质交换延迟发生. 模型 B5 物质交换发生的时间较晚, 这是由于低金属丰度恒星半径小, 较晚达到洛希瓣半径. 并且模型 B5 进行了三次物质交换, 这与低金属丰度半径小, 损失较少的氢包层有关. 另外, 由于星风物质损失, 造成双星间距变宽. 所以低金属丰度模型, 相同条件下有较小洛希瓣半径, 较容易发生洛希瓣物质交换. 模型 B4 由于轨道周期最长, 只进行一次物质交换且发生在中心氦燃烧.

图 6(a) 给出了所有单星模型的赫罗图的演化轨迹. 在零龄主序, 比较 S1, S2 和 S3, 发现快速转

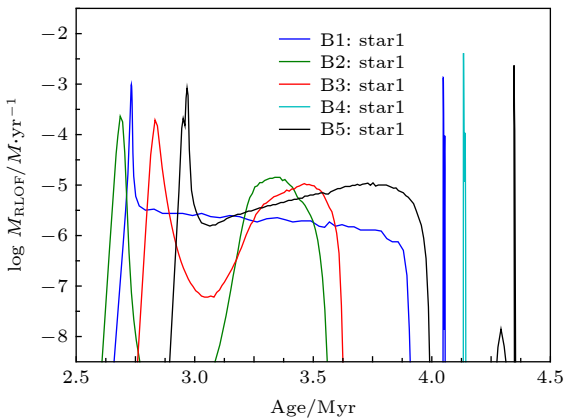


图 5 双星模型洛希瓣物质交换率随时间的演化

Fig. 5. Rate of mass transfer during Roche lobe overflow vary with evolutionary time for the models of binary star.

动趋向使恒星向低温和低光度端移动, 恒星中心温度和中心密度均变低 (见表 3). 这是因为离心力减小了恒星表面的重力加速度, 使恒星等效为较小质量星. 此时, 比较 S1, S5, 发现低金属丰度模型 S5 具有较高的有效温度和光度. 这是因为: 1) 低金属丰度, 不透明度小, 包层变得透明, 恒星物质保持集聚; 2) 低金属恒星碳, 氮, 氧元素少, 核燃烧不得不部分依靠 PP 链, PP 链对温度的依赖性远小于 CNO 循环. 零龄主序前, 为获得较高的中心温度, 低金属丰度恒星半径变小, 对流核变大, 有效温度和光度均变大. 模型 S4 的质量小于模型 S2, 因而在 ZAMS 时中心温度和密度较低 (见表 3), 在演化后期形成低光度 WR 星. 另外, 比较 S1, S2 在 TAMS 的演化时间 (见表 3) 可以看出, 转动效应可以增加恒星在主序的演化时间. 同时, 恒星的有效温度和光度变大. 这主要有两方面原因, 一方面转动混合增加了对流核的大小 (见图 2(a)), 另一方面转动混合减小了包层的不透明度. 由于模型 S5 的金属丰度低, 星风损失少, 氢包层不容易去除, 在氦燃烧阶段并不形成 WR 星. 对比 S4 和 S5, 这说明并不是质量越大的恒星就一定形成 WR 星, 金属丰度的影响甚于恒星质量的影响. 模型 S6 经历化学成分均匀演化, 尽管金属丰度低, 星风弱, 也形成了 WR 星. 比较模型 S1 和 S2, 在主序后期模型 S2 的光度大. 实际上模型 S2 的半径反而比模型 S1 小, 这是因为转动效应使大量的氦混合到氢包层, 使包层不透明度变小造成的. 总之, 比较 5 个单星模型, 发现高金属丰度, 低速或不转动恒星易形成高光度 WR 星.

图 6(b) 给出了所有双星模型的赫罗图的演化

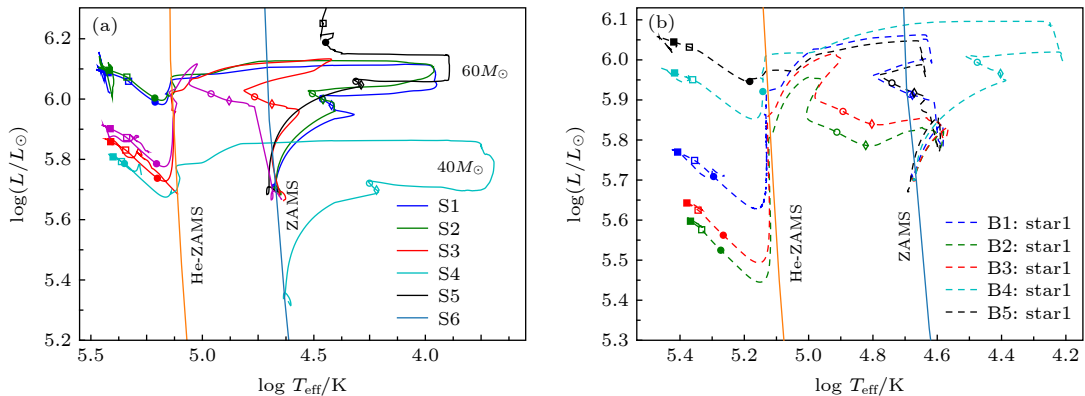


图 6 (a) 单星模型在赫罗图中演化; (b) 双星模型中的主星在赫罗图中的演化; 双星模型的初始偏心率为 0

Fig. 6. (a) Evolutionary tracks in HR diagram for single stars; (b) evolutionary tracks in HR diagram for binaries.

轨迹. 低金属丰度双星系统 B5 和初始大轨道周期的双星系统 B4, 在主序后的演化可以产生高光度 WR 星. 比较模型 B1 和 B2, 结果展示双星系统的转动效应产生低光度 WR 星, 这与主序阶段物质损失有关.

图 7(a) 给出了单星模型的表面氢的质量丰度随中心氮的质量丰度的变化. 图 7(b) 给出了单星模型表面有效温度随中心氮的质量丰度的变化. 在主序阶段, 比较模型 S1, S2, S3 和 S6, 发现快速转动恒星, 表面氢丰度下降快. 这主要有两方面的原因: 1) 由于转动混合造成氢元素向核反应区转移; 2) 更主要的原因是快速转动恒星造成氢包层逐渐快速丢失, 氮丰度增加迅速的缘故. 发现模型 S5 在中心氮消耗完, 表面氢丰度达到 $X_H = 0.34$, 这是由于该模型金属丰度低, 星风弱造成. 通常说表面氢丰度下降快, 意味着恒星丢失更多的氢包层, 表面有效温度变高, 恒星向蓝端移动 (见图 7(b) 和图 7(d)). 比较模型 S2 和 S4, 发现低质量星氢丰度减小得慢. 这是因为低质量星星风损失

较弱, 在主序阶段演化为黄超巨型 (黄超巨型定义为: $3.68 < \log T_{\text{eff}} < 3.88$). 比较模型 S1 和 S2 在主序后的演化, 发现模型 S1 的表面氢在中心氮质量丰度高时消失, 这是因为模型 S1 的表面有效温度较高, 星风损失率高造成的. 实际上, 星风物质损失也与金属丰度有密切关系. 如模型 S6 虽然经历化学成分均匀演化, 表面温度比较高, 但是由于主序后模型 S6 金属丰度较低, 所以模型 S6 表面氢丰度下降的反而比模型 S3 较慢 (见图 7(a)).

图 7(c) 给出了双星模型的表面氢的质量丰度随中心氮的质量丰度的变化. 图 7(d) 给出了双星模型表面有效温度随中心氮的质量丰度的变化. 比较模型 S1 和 B1, 在主序阶段氢丰度在双星模型中下降得快, 这是因为双星系统洛希瓣物质交换除去氢包层造成的. 由于单星模型 S4 没有经历洛希瓣物质交换, 可以演化到黄巨星, 而所有双星模型在整个演化阶段始终为蓝超巨型 ($\log T_{\text{eff}} > 3.88$). 另外, 双星模型 B5 表面氢丰度在中心氮最小时变为零. 这说明低金属丰度模型, 半径较小, 双星洛希

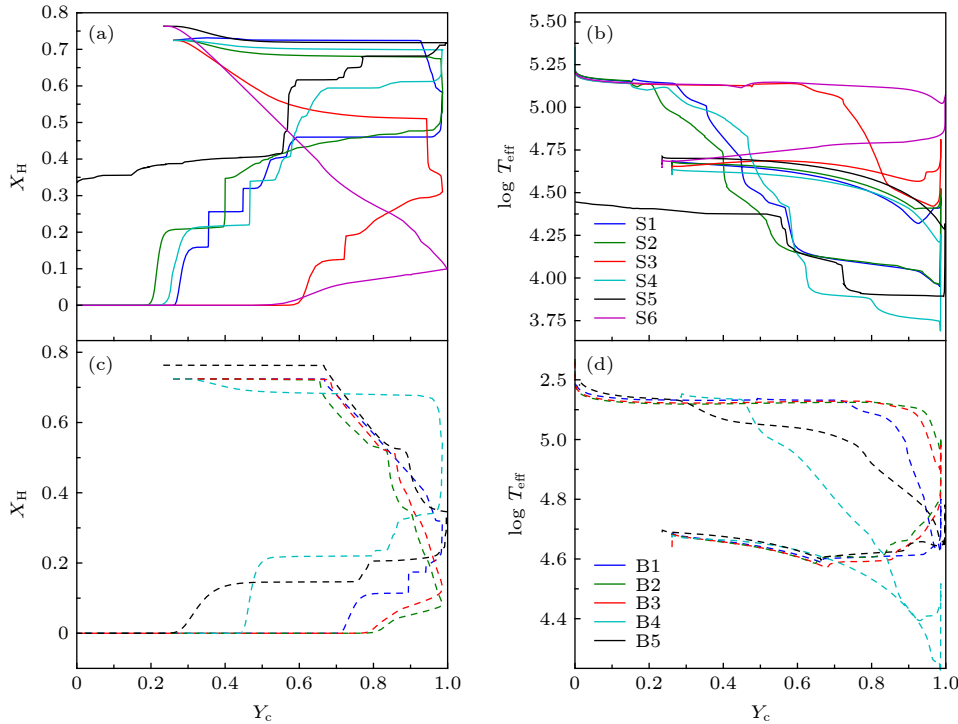


图 7 (a) 单星模型表面氢的质量丰度随中心氮质量丰度的变化; (b) 单星模型表面有效温度随中心氮质量丰度的变化; (c) 双星模型表面氢的质量丰度随中心氮质量丰度的变化; (d) 双星模型表面有效温度随中心氮质量丰度的变化

Fig. 7. (a) Surface mass fraction of hydrogen varies with central helium mass fraction in models of single star; (b) surface effective temperature varies with central helium mass fraction in models of single star; (c) surface mass fraction of hydrogen varies with central helium mass fraction in models of binary star; (d) surface effective temperature varies with central helium mass fraction in models of binary star.

瓣物质较困难, 仅除去了极少的氢包层, 所以在主序后 ($0.3 < \log Y_{\text{He,C}} < 0.98$), 模型 B5 的有效温度最低.

4 结论和讨论

1) 星风物质损失、双星系统物质交换、化学成份均匀演化是形成 WR 星的 3 个非常重要的演化途径. WR 星演化和内部核合成与恒星质量、初始转动速度、轨道周期、金属丰度等物理因素有密切关系. 单星模型的星风物质损失率越大, 越容易产生 WR 星. 因而恒星质量越大 (恒星温度和光度大)、金属丰度越高 (Fe 原子含量高), 越容易形成 WR 星. 非转动大质量单星 S1, 在主序后期发生双稳定性跳变, 丢失氢包层, 对形成 WR 星有重要影响.

2) 对 WR 星的形成, 金属丰度比恒星质量更重要. 金属丰度低的恒星由于星风弱, 不容易除去氢包层, 在 WR 星阶段有较低的有效温度. 因而单星模型 S5 尽管有较大的恒星质量, 由于金属丰度低, 并不产生 WR 星. 然而快速转动的低金属丰度的恒星, 元素混合时标短于核时标, 恒星内部不产生平均分子量栅栏, 氢包层和核反应区之间可以充分混合, 产生化学成分均匀演化 (模型 S6). 这样的模型对流核大, 氢包层比较薄, 反而容易形成 WR 星, 并且 WR 星阶段提前发生在主序阶段. 这说明快速转动可促使低金属丰度恒星形成 WR 星.

3) 对比低金属模型 S5 和 B5, 发现恒星处在双星系统中可产生 WR 星. 这是因为双星系统发生洛希瓣物质交换, 将主星大量的氢包层物质转移到次星上. 双星系统的轨道周期对 WR 星的形成也有重要影响 (对比模型 B2 和 B4), 长轨道周期的双星系统 B4, 洛希瓣半径大, 另外, 物质交换前星风物质损失也趋向使轨道间距变宽, 不容易发生洛希瓣物质交换, 这样氢包层除去少, 恒星的有效温度低. 短轨道周期的双星系统 B2, 洛希瓣物质交换使 WR 阶段提前发生在主序阶段.

总之, 双星系统的洛希瓣物质交换和星风的联合作用使恒星趋向产生低光度的 WR 星. 研究发现双星模型的 ^4He , ^{12}C , ^{19}F , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{25}Mg 的质量丰度高于相同初始条件的单星模型, 而 ^1H , ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne 和 ^{26}Al 质量丰度下降, 这说明洛希瓣物质交换减小了恒星内部的温度, 因而影响这些元素

的核合成过程.

4) 非转动恒星氮增丰现象依赖星风物质损失和洛希瓣物质交换. 快速转动产生离心力, 增加星风损失量, 使恒星快速损失氢包层, 产生氮增丰. 另外转动效应产生元素混合和角动量转移, 使恒星表面氮元素增丰快, 减小包层的不透明度, 使恒星具有较高的光度. 双星系统中由于潮汐同步过程, 使初始转动速度大的子星, 转动变慢, 因而在主序阶段双星系统中氮元素增丰没有单星的氮元素超丰显著. 然而在主序后, 低金属丰度双星模型 B5 具有较厚的氢包层, 由于潮汐效应可以保持较高的转动速度, 中心氢燃烧生成的碳元素进入氢燃烧壳层, 产生氮元素强烈增丰, 这是氮增丰的重要机制. 总之, 大质量恒星, 初始转速快, 金属丰度高, 短轨道周期等物理条件, 容易除去氢包层, 产生裸露的氮核, 容易形成 WR 星.

参考文献

- [1] Wolf C J E, Rayet G 1867 *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus* **65** 292
- [2] Georgy C, Ekstrom S, Meynet G, Massey P, Levesque E M, Hirschi R, Eggenberger P, Maeder A 2012 *Astron. Astrophys.* **542** A29
- [3] Groh J H, Meynet G, Georgy C, Ekstrom S 2013 *Astron. Astrophys.* **558** A131
- [4] Eldridge J J, Fraser M, Smartt S J, Maund J R, Crockett R M 2013 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **436** 774
- [5] Vuissoz C, Meynet G, Kudlseder J, Cervino M, Schearer D, Palacios A, Mowlavi N 2004 *New Astron. Rev.* **48** 7
- [6] Huang R Q 2006 *Stellar Physics* (2nd Ed.) (Beijing: Science and Technology of China Press) pp378–384 (in Chinese) [黄润乾 2006 恒星物理 (第2版) (北京: 中国科学技术出版社) 第378—384页]
- [7] Paczynski B 1971 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **9** 183
- [8] Huang R Q 2004 *Astron. Astrophys.* **422** 981
- [9] Huang R Q 2004 *Astron. Astrophys.* **425** 591
- [10] Kippenhahn R, Thomas H C 1969 *Mitt. A. G.* **27** 168
- [11] Endal A S, Sofia S 1976 *Astrophys. J.* **210** 184
- [12] Pinsonneault M H, Kawaler S D, Sofia S, Demarque P 1989 *Astrophys. J.* **338** 424
- [13] Pinsonneault M H, Kawaler S D, Demarque P 1990 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **74** 501
- [14] Pinsonneault M H, Deliyannis C P, Demarque P 1991 *Astrophys. J.* **367** 239
- [15] Song H F, Wang J Z, Li Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059701 (in Chinese) [宋汉峰, 王靖洲, 李云 2013 物理学报 **62** 059701]
- [16] Song H F, Wang J Z, Song F, Song F, Wang J T 2017 *Astron. Astrophys.* **600** A42
- [17] Zhan Q, Song H F, Tai L T, Wang J T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 089701 (in Chinese) [詹琼, 宋汉峰, 邵丽婷, 王江涛 2015 物理学报 **64** 089701]
- [18] Tai L T, Song H F, Wang J T 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 049701 (in Chinese) [邵丽婷, 宋汉峰, 王江涛 2016 物理学报

- 65 049701]
- [19] Zahn J P 1975 *Astron. Astrophys.* **41** 329
- [20] Zahn J P 1977 *Astron. Astrophys.* **57** 383
- [21] Maeder A, Meynet G 2000 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **38** 143
- [22] de Mink S E, Cantiello M, Langer N, Pols O R, Brott I, Yoon S C 2009 *Astron. Astrophys.* **497** 243
- [23] Song H F, Meynet G, Maeder A, Ekstrom S, Eggenberger P 2016 *Astron. Astrophys.* **585** A120
- [24] Maeder A 1987 *Astron. Astrophys.* **178** 159
- [25] Wang J T, Song H F 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 099702
- [26] Li Z, Song H F, Peng W G 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 079701
- [27] Meynet G, Maeder A 1997 *Astron. Astrophys.* **321** 465
- [28] Endal A S, Sofia S 1978 *Astrophys. J.* **220** 279
- [29] Kippenhahn R 1974 *Late Stages of Stellar Evolution* (Warsaw: D Reidel Publishing Co) p20
- [30] Heger A, Langer N, Woosley S E 2000 *Astrophys. J.* **528** 368
- [31] Vink J S, de Koter A, Lamers H J G L M 2000 *Astron. Astrophys.* **362** 295
- [32] Vink J S, de Koter A, Lamers H J G L M 2001 *Astron. Astrophys.* **369** 574
- [33] Nugis T, Lamers H J G L M 2000 *Astron. Astrophys.* **360** 227
- [34] Eldridge J J, Vink J S 2006 *Astron. Astrophys.* **452** 295
- [35] Paxton B, Bildsten L, Dotter A, Herwig F, Lesaffre P, Timmes F 2011 *Astrophys. J. Suppl.* **192** 3P
- [36] Paxton B, Cantiello M, Arras P, Bildsten L, Brown E F, Dotter A, Mankovich C, Montgomery M H, Stello D, Timmes F X, Townsend R 2013 *Astrophys. J. Suppl.* **208** 4P
- [37] Paxton B, Marchant P, Schwab J, Bauer E B, Bildsten L, Cantiello M, Dessart L, Farmer R, Hu H, Langer N, Townsend R H D, Townsley D M, Timmes F X 2015 *Astrophys. J. Suppl.* **220** 15P
- [38] Meynet G, Maeder A 2002 *Astron. Astrophys.* **381** 25

Formation and internal nucleosynthesis in massive rotating Wolf-Rayet stars*

Peng Wei-Guo¹⁾ Song Han-Feng^{1)2)4)†} Zhan Qiong^{1)‡}
 Wu Xing-Hua¹⁾³⁾ Jing Jiang-Hong¹⁾

1) (*College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

2) (*Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China*)

3) (*School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 556011, China*)

4) (*Department of Astronomy, University of Geneva, Geneva 1290, Switzerland*)

(Received 8 July 2019; revised manuscript received 12 August 2019)

Abstract

Wolf-Rayet stars (WR stars) were discovered by French astronomers Charles Wolf and Georges Rayet in 1867. The Wolf-Rayet (WR) stars are the evolved descents of the most massive, extremely hot (temperatures up to 200000 K) and very luminous ($10^5 L_{\odot} - 10^6 L_{\odot}$) O stars, with $25 M_{\odot} - 30 M_{\odot}$ solar mass for solar metallicity. The WR stars possess very strong stellar winds, which have velocities up to 3000 km/s and wind mass loss rate $10^{-5} M_{\odot}$ a year. These winds are observed in the broad emission line profiles (sometimes, even P-Cygni profiles) of WR spectra in the optical and UV range. Actually, these winds are so strong that they can peel the star and convert it into a nude nucleus without envelope. It has been found that three bright galactic stars located at Cygnus region have broad strong emission bands, rather than absorptions lines, superposed on the typical continuum of hot stars. In 1930 Beals correctly identified these features as emission lines produced by high ionized elements such as helium, carbon, nitrogen and oxygen. The physical factors which can affect the evolution of WR stars are explored in this paper. These physical factors include stellar mass, initial velocities, orbital periods, metallicities, etc. According to the equations for angular momentum transfer and chemical

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11463002, 11863003), the Project for Science and Technology Plan in Guizhou Province, China (Grant No. [2018]5781), and the Open Foundation of the Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Science (Grant No. OP201405).

† Corresponding author. E-mail: hfsong@gzu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhanqiong1108@163.com

element diffusion, we can ascertain how these physical factors influence the evolution of WR stars and the mixing of chemical elements in WR stars. The result indicates that massive stars with high initial velocities and metallicities have strong stellar winds and be prone to producing WR stars. In contrast with the counterpart with high metallicities, it is hard for the single star with low metallicity to generate WR star due to weak wind. However, the star with very high initial velocity and low metallicity can form chemical homogenous evolution. The star has an enlarged convective core and a very thin hydrogen envelope and it can also generate WR star. The component in the binary system with short orbital period can transfer mass to the companion star through Roche lobe overflow, and this physical process can produce WR star under the condition of low metallicity. Furthermore, mass removal due to Roche lobe overflow reduces the temperature of stellar convective core and rate of nuclear reaction. It is shown that mass metallicities of chemical elements including ^4He , ^{12}C , ^{19}F , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{25}Mg in the primary star are higher than those in the single stars, whereas mass metallicities of chemical elements including ^1H , ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne , and ^{26}Al are lower than those in the single counterparts. In a word, the conditions for massive stars with high initial velocities and metallicities in the binary system with short orbital period favor the formation of WR stars.

Keywords: close binaries, evolution, rotation, tide

PACS: 97.80.Fk, 97.10.Cv, 97.10.Kc, 92.60.hh

DOI: [10.7498/aps.68.20191040](https://doi.org/10.7498/aps.68.20191040)