

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.03.13

利用 BSE 算法对 B 型热亚矮星的研究

王小刚^{1,2} 张奉辉^{1,3,4}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 天体结构与演化实验室, 昆明 650216; 4. 云南省国际超新星研究重点实验室, 昆明 650216)

摘要: B 型热亚矮星是一种具有非常薄氢壳层的中心氦核燃烧天体。一般认为 B 型热亚矮星的形成需要经过双星间的相互作用, 研究 B 型热亚矮星的双星形成通道具有重要意义。通过修改快速双星演化算法研究了双星形成 B 型热亚矮星的稳定洛希瓣物质转移、公共包层抛射以及双氦白矮星并合通道, 并且计算了 42 组不同初始参数设置条件下这些双星通道形成 B 型热亚矮星的参数空间。模型 17 得到的短轨道周期和长轨道周期 B 型热亚矮星轨道周期分布能够解释观测数据的轨道周期分布。而且模型 17 中通过稳定的洛希瓣物质转移和公共包层抛射通道形成的 B 型热亚矮星质量分布在 $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$ 之间有一个明显的峰值, 双氦白矮星并合通道形成的 B 型热亚矮星在 $0.50 \sim 0.60 M_{\odot}$ 之间也出现了一个峰值, 它们基本符合理论预测和观测上所得到的 B 型热亚矮星质量分布。因此模型 17 被认为是 42 组模型中的最佳模型。

关键词: B 型热亚矮星; 周期; 质量

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引言

B 型热亚矮 (hot subdwarf-B, sdB) 星是一种具有极薄氢壳层 ($<0.02 M_{\odot}$) 的中心氦核燃烧天体。sdB 星具有很高的表面有效温度, 其位于赫罗图上水平分支的最蓝端, 在球状星团中也常被称为极端水平分支星。在天体物理的研究中, sdB 星是一类很重要的天体。sdB 星被认为是椭圆星系紫外反转的主要来源^[1]。由 sdB 星产生的紫外流量能够改变星族光谱能量分布的整体形状^[2], 并且影响恒星形成率的定标关系^[3, 4]。由一颗 sdB 星和大质量碳氧白矮星组成的密近双星系统可能是 Ia 型超新星前身星的候选体, 并且部分密近 sdB 星双星系统也是重要的引力波源^[5]。观测上发现部分 sdB 星具有明显的 C、N、O 元素以及 Ti、Sc、Cr、Pb 等重金属元素增丰现象, 它们也是研究金属元素的产生以及元素扩散效应的理想天体^[6, 7]。

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-25

资助项目: 国家自然科学基金 (11973081)

通讯作者: 王小刚, wangxiaogang@ynao.ac.cn

由于 sdB 星的氢壳层很薄, 它们的前身星必须在点燃氦核之前丢失绝大部分氢壳层。但恒星的单星演化理论很难解释是什么机制主导了 sdB 星前身星如此多的质量损失。观测发现有接近一半的 sdB 星处在密近双星系统中 [8--12], 双星间的相互作用可能在 sdB 星的形成中发挥着重要作用 [13]。稳定的洛希瓣物质转移 (Roche lobe overflow, RLOF)、公共包层 (common envelope, CE) 抛射以及双氦白矮星 (helium-white dwarf, He-WD) 并合是 sdB 星的主要形成通道。一般认为, 稳定的 RLOF 通道主要形成长轨道周期的复合光谱 sdB 星双星系统 [1, 14--18], 它们的轨道周期从几百天到超过一千天。密近 sdB 星双星系统只能通过 CE 抛射通道形成 [1, 14, 19, 20], 大部分密近 sdB 星双星系统的伴星是白矮星、小质量主序星或者褐矮星, 它们的**双星绕转轨道周期**从几十分钟到几天。Ge 等人 [21, 22] 详细研究了不同 CE 抛射系数对形成密近 sdB 星双星系统的影响, 他们最终得到的模拟结果和观测给出的 sdB 星轨道周期分布相一致。最近 Li 等人 [23] 提出了一种新的热亚矮星形成模型, 即恒星在渐进巨星分支阶段发生 CE 抛射可以形成高温且富氦的热亚矮星。而 sdB 星单星很可能是通过双 He-WD 并合通道形成的 [1, 16, 24--28]。

传统认为 sdB 星的质量集中分布在 $0.47 M_{\odot}$ 附近 [29, 30], 但 Han 等人 [14] 的研究结果表明 sdB 星的质量在 $0.30 \sim 0.80 M_{\odot}$ 之间分布, 并在 $0.46 M_{\odot}$ 附近有一个明显的峰值。Arancibia 等人 [31] 考虑了不同金属丰度以及对流超射对恒星最终生成氦核质量的影响后, 利用 MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) 恒星演化程序重新计算 sdB 星的质量范围。他们的计算结果表明 sdB 星的质量并不是集中分布在 $0.47 M_{\odot}$ 附近, 而是还有一部分 sdB 星的质量分布在 $0.30 \sim 0.45 M_{\odot}$ 以及 $0.50 \sim 0.90 M_{\odot}$ 之间。sdB 星的质量可能并不是集中分布在 $0.47 M_{\odot}$ 附近, 而是在一定范围内分布。

Clausen 等人 [32] 利用快速双星演化 (binary star evolution, BSE) 算法计算了通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星轨道周期和质量分布。然而他们的结果与 Schaffenroth 等人 [33] 和 Vos 等人 [17] 通过观测给出的短轨道周期 sdB 星以及长轨道周期 sdB 星的轨道周期分布似乎不能相符; 另外, Clausen 等人 [32] 并未研究双 He-WD 并合通道形成 sdB 星的**演化**。Clausen 等人 [32] 的工作仍为利用 BSE 研究形成 sdB 星参数空间的最新进展, 但是他们的研究工作存在一些问题。为了解决以前研究者所遗留的问题并详细地研究通过双星间相互作用形成 sdB 星的参数空间, 我们利用修改的 BSE 计算了稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合通道形成 sdB 星的轨道周期和质量等分布, 并将我们所得到的**计算结果和现有的观测数据**进行了对比。

本文的结构如下: 在第二部分我们介绍了 BSE 中的一些参数设定。第三部分为我们的研究结果。第四部分是我们对研究结果的讨论与总结。

2 研究方法

2.1 修改模型参数

我们使用的 BSE 双星演化代码来自于 Hurley 等人 [34, 35], 它是一种快速计算恒星演化的方法。在这篇文章中我们通过调节一些 BSE 参数设置以更好地研究通过不同通道形成 sdB 星的轨道周期和质量等分布特征。我们仅给出了与 sdB 星演化相关的一些重要参数, 关于 BSE 的其它参数及详细介绍请参考 Hurley 等人 [35] 的文章。

表 1 BSE 算法中给出的氦闪/氦核燃烧的最小质量。*

$M_0 (M_\odot)$	$M_c^{\min} (M_\odot)$	$M_c^{\text{tip}} (M_\odot)$
(1)	(2)	(3)
0.800	0.4564	0.4773
1.000	0.4545	0.4765
1.260	0.4523	0.4752
1.600	0.4467	0.4724
1.700	0.4414	0.4658
1.800	0.4196	0.4419
1.900	0.3686	0.3865
2.000	0.3181	0.3185
2.300	0.3192	0.3481
2.500	0.3200	0.3731
3.000	0.4181	0.4505
3.500	0.5194	0.5422
4.000	0.6225	0.6431
4.500	0.7307	0.7507
5.000	0.8388	0.8635

* M_0 : 初始主序星质量; M_c^{\min} : 氦核点燃的最小质量; M_c^{tip} : 在红巨星顶端的氦核质量。

在原来的 BSE 中, 对于质量小于 $1.995 M_\odot$ 且具有太阳丰度 ($Z = 0.02$) 的零龄主序恒星, 如果它在演化至红巨星顶端之前通过稳定的 RLOF 或 CE 抛射过程失去大部分氢壳层, 其并不会点燃氦核成为 sdB 星, 而是直接冷却为 He-WD 星。Han 等人 [1] 的研究结果表明恒星在演化至红巨星顶端之前失去氢壳层仍然可以点燃氦核成为 sdB 星, 他们计算了不同质量恒星演化至红巨星顶端的氦核质量 M_c^{tip} 和恒星在靠近红巨星顶端失去氢壳层后能够点燃氦核的最小质量 M_c^{\min} 。为了能够利用 BSE 形成更多符合理论预测的 sdB 星, Clausen 等人 [32] 在 BSE 中利用 $M_c^{\min}/M_c^{\text{tip}} = 0.95$ 粗略地计算了能够形成 sdB 星的 M_c^{\min} 。而 Han 等人 [1] 在其表 1 中给出的不同质量恒星的 $M_c^{\min}/M_c^{\text{tip}}$ 并不相同, Clausen 等人 [32] 的方法可能并不准确, 为此我们重新计算了适用于 BSE 的 M_c^{\min} 。首先我们在 BSE 中利用单星演化算法计算了不同质量恒星演化至红巨星顶端的氦核质量 M_c^{tip} , 然后利用 Han 等人 [1] 在其表 1 中考虑了对流超射以及金属丰度为 0.02 的不同质量恒星所对应的不同 $M_c^{\min}/M_c^{\text{tip}}$ 计算出了 BSE 中不同质量恒星的最小氦核燃烧质量, 结果如表 1 所示。之后根据所得到不

同质量恒星的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} 利用插值的方法得到了从 $0.80 \sim 5.0 M_\odot$ 之间所有恒星的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} ，并将它们作为我们最终模拟得到 sdB 星的判据之一。图 1 中红色的点线和点虚线分别为 Han 等人^[1] 计算得到的不同质量恒星的 M_c^{min} 和 M_c^{tip} 变化曲线，黑色的虚线和实线表示我们利用 BSE 得到的不同质量恒星的 M_c^{min} 和 M_c^{tip} 变化曲线。可以看出我们利用 BSE 计算的结果与 Han 等人^[1] 给出的 M_c^{min} 和 M_c^{tip} 具有相同的分布趋势，但也存在一些差异。对于质量大概在 $1.4 \sim 2.0 M_\odot$ 和 $3.0 \sim 5.0 M_\odot$ 的主序星，我们得到了一个更大质量的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} 。这可能是由于不同演化程序中内置了不同的参数设置，导致了不同 M_c^{tip} 的出现。

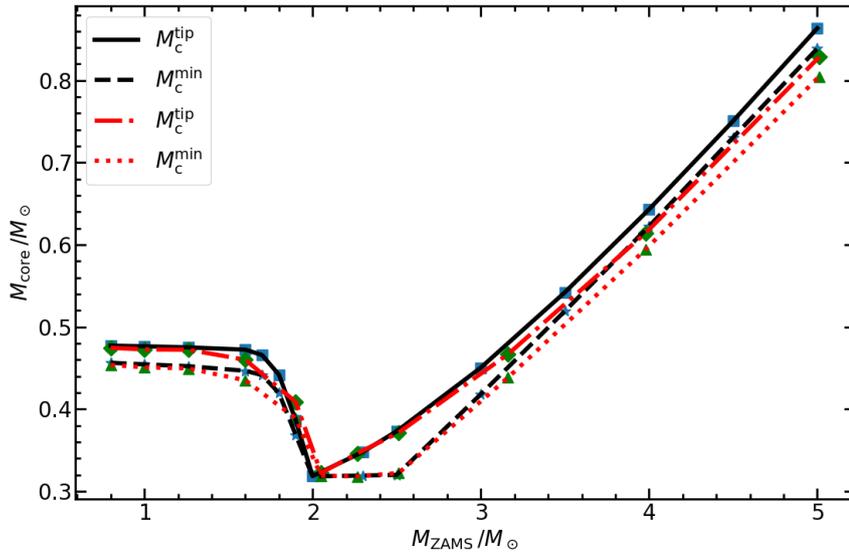


图 1 不同质量恒星产生的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} 分布。黑色线为我们利用 BSE 得到的结果，红色线为 Han 等人^[1] 计算的结果。蓝色的方形和五角星分别为表 1 给出的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} 值，绿色的菱形和三角形分别为 Han 等人^[1] 给出的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} 值。

双星中的主星充满洛希瓣时，主星和伴星的质量比 ($q = \frac{M_a}{M_b}$) 决定了双星间的物质转移是否动力学稳定。当 q 小于临界质量比 q_{crit} 时发生稳定的 RLOF，否则双星系统将形成 CE。在 BSE 中，主星在红巨星阶段进行稳定 RLOF 的判据 q_{crit} 为：

$$q_{\text{crit}} = 0.362 + \frac{1}{3(1 - \frac{M_{\text{cd}}}{M_a})}, \quad (1)$$

其中 M_{cd} 为主星的内核质量， M_a 为主星的全部质量。除了公式 (1) 给出的 q_{crit} 值外，我们还利用 Han 等人^[14] 所采用的 $q_{\text{crit}} = 1.5$ 来计算稳定的 RLOF 过程。而我们将主星在赫氏空隙阶段能够进行稳定 RLOF 的判据设置为 $q_{\text{crit}} = 3.2$ 或 4.0 (分别为 Han 等人^[14] 和 Hurley 等人^[35] 所采用的值)，其中 4.0 为 BSE 默认值。

当双星中发生稳定的 RLOF 时，主星失去的物质可能不会被伴星完全吸积，而是从双

星系统中丢失。因此我们在 BSE 中改变了控制这个模拟过程的相应参数。在 BSE 默认的情况下, 处于主序或赫氏空隙阶段的伴星吸积物质受热时标限制, 伴星所能增加的物质质量与主星损失物质质量的比值 f_{RLOF} 为:

$$f_{\text{RLOF}} = \min(1.0, 10 \frac{M_a}{\dot{M}_d \tau_{\text{KH}\alpha}}), \quad (2)$$

其中 $0 \leq f_{\text{RLOF}} \leq 1$, M_a 为伴星的质量, \dot{M}_d 为主星的质量损失率, $\tau_{\text{KH}\alpha}$ 为伴星的 Kelvin-Helmholtz 时标。我们分别使用了由公式 (2) 所给出的 f_{RLOF} 以及 $f_{\text{RLOF}} = 0.5$ 来检验物质转移率的影响。

当双星间发生非守恒的物质转移时, 会有一部分轨道角动量伴随物质从双星系统中丢失。我们分别采用了轨道角动量损失因子 $\gamma = 1$ 和 -1 来模拟这个过程。其中 $\gamma = 1$ 表示双星发生物质转移时损失的物质带走与系统轨道角动量成比例的特定轨道角动量, $\gamma = -1$ 表示双星发生物质转移时损失的物质带走与主星轨道角动量成比例的特定轨道角动量。我们在模型中还分别采用了 CE 抛射系数 α_{CE} 为 0.75、1.5 以及 3.0 三个值来模拟 CE 抛射过程, α_{CE} 值越大双星形成的 CE 将越容易被抛射。另外, 我们的 Reimers 星风系数 η 为 0.25, 双星中 CE 演化束缚能因子 $\lambda=0.5$ 。

2.2 双星间的初始参数设置

我们使用大样本演化方法演化了 42 组不同的模型, 其中每个模型同时演化了从零龄主序开始的 10^6 组双星。对于每组双星中的主星质量 M_1 , 我们依据 Kroupa 等人 [36] 的初始质量函数 (initial mass function, IMF) 公式获得, 即

$$\xi(M_1) = \begin{cases} a_1 M_1^{-1.3}, & 0.1 \leq M_1/M_\odot \leq 0.5, \\ a_2 M_1^{-2.2}, & 0.5 \leq M_1/M_\odot \leq 1.0, \\ a_2 M_1^{-2.7}, & 1.0 \leq M_1/M_\odot \leq 100, \end{cases} \quad (3)$$

其中, M_1 以太阳质量 M_\odot 为单位, a_1 和 a_2 为归一化常数。同时, 我们依据双星间的均匀质量比 q [37, 38] 分布:

$$n(1/q) = 1, \quad (4)$$

给出每组双星的伴星质量 $M_2 = qM_1$ 。对于每组模型的双星间距分布, 如果双星间距足够大, 则间距的对数分布为常数; 若间距足够小, 则双星数量随间距的对数减小而减少。即

$$an(a) = \begin{cases} \alpha_{\text{sep}} \left(\frac{a}{a_0}\right)^m, & a \leq a_0, \\ \alpha_{\text{sep}}, & a_0 < a < a_1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\alpha_{\text{sep}} \approx 0.07$, $a_0 = 10 R_\odot$, $a_1 = 5.75 \times 10^6 R_\odot$, $m \approx 1.2$ [39]。这种分布意味着大约 50% 的双星轨道周期小于 100 yr。我们将每组双星的初始轨道偏心率 e 设置为 0, 即假设所有的双星初始轨道为圆轨道。另外, 所有模型的金属丰度 $Z = 0.02$, 最大演化年龄为 15 Gyr。

3 研究结果

稳定的 RLOF、CE 抛射和双 He-WD 并合通道是双星形成 sdB 星的主要方式。在本文中，我们通过修改 BSE 参数设置实现了双星中不同通道形成 sdB 星的演化过程，并且将我们计算得到的 sdB 星和观测数据进行了一系列对比。下面是本文的研究结果。

表 2 利用 BSE 得到的通过不同通道形成 sdB 星的计算结果。表中 BSE 符号表示由 BSE 默认公式计算的 f_{RLOF} 和 q_{crit} 值，各个模型的参数设置以及通过不同通道形成 sdB 星的数目等结果详见该表。

模型	α_{CE}	λ	γ	M_{He}	f_{RLOF}	q_{crit} (RGB)	q_{crit} (HG)	RLOF (RGB)	RLOF (HG)	CE1	CE2	Merger	样本总数
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.70	61.31	4.62	33.37	0	995
2	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.60	60.75	4.27	34.39	0	1172
3	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.33	28.91	26.73	44.03	0	2110
4	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.30	30.58	24.74	44.37	0	2328
5	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.22	19.52	43.46	36.80	0	3125
6	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	BSE	4.0	0.21	21.20	41.22	37.37	0	3358
7	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.81	29.58	47.28	19.27	3.05	2096
8	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.76	31.29	44.22	19.78	3.96	2250
9	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.53	18.75	47.06	26.00	7.66	3211
10	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.49	20.49	44.34	25.94	8.73	3435
11	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.40	13.45	51.40	24.19	10.59	4477
12	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	BSE	4.0	0.36	14.83	49.03	24.00	11.78	4746
13	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	15.28	17.03	15.88	20.39	31.43	5145
14	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	14.84	17.98	15.45	20.65	31.08	5289
15	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	13.25	14.77	20.05	23.37	28.56	5931
16	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	12.85	15.56	19.44	23.60	28.56	6111
17	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	12.64	14.09	27.25	24.18	21.83	6111
18	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	BSE	1.5	3.2	12.21	14.79	26.41	24.23	22.36	6430
19	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	24.18	15.18	16.36	12.54	31.74	3900
20	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	17.78	17.36	13.78	17.15	33.93	4798
21	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	19.23	12.07	19.94	14.45	34.31	4905
22	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	14.79	14.44	17.46	21.50	31.81	5768
23	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	16.81	10.55	26.40	16.88	29.35	5609
24	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{min}}$	0.5	1.5	3.2	13.46	13.15	23.97	23.28	26.15	6337
25	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	18.29	20.19	1.03	19.65	40.84	3012
26	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	11.77	23.58	1.40	23.30	39.95	3867
27	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	13.53	14.93	9.11	22.99	39.43	4071
28	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	9.07	18.19	7.98	30.69	34.08	5015
29	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	11.59	12.79	18.41	24.88	32.33	4754
30	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	1.5	3.2	8.18	16.39	16.41	32.23	26.78	5563
31	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	8.34	20.84	5.00	32.49	33.33	4198
32	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	8.01	22.00	4.82	32.53	32.65	4359
33	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	6.84	17.10	11.37	36.54	28.16	5118
34	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	6.55	18.00	10.90	36.69	27.87	5329
35	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	6.60	16.49	20.51	37.71	18.70	5306
36	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	BSE	1.5	3.2	6.28	17.26	19.66	37.53	19.26	5555
37	0.75	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	1.66	64.30	6.05	25.11	2.87	661
38	0.75	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	0.69	63.97	4.34	27.54	3.46	1013
39	1.50	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	0.83	31.98	40.86	23.70	2.63	1329
40	1.50	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	0.29	26.78	23.51	39.46	9.96	2420
41	3.00	0.5	1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	0.45	17.31	54.09	21.67	6.48	2455
42	3.00	0.5	-1	$M_{\text{c}}^{\text{tip}}$	0.5	BSE	4.0	0.18	16.59	35.47	34.09	13.67	3907

3.1 模拟特征

表 2 中给出了 BSE 中 42 个模型的参数设置以及各个模型中每个通道形成 sdB 星的百分比和样本总数。第 2 ~ 8 列为控制双星演化过程的一些参数, 第 9 ~ 13 列为各个通道形成 sdB 星的百分比。其中第 9、10 列分别为主星在红巨星阶段和赫氏空隙阶段发生稳定的 RLOF 并形成具有主序星伴星的 sdB 星百分比, 第 11、12 列为通过第一、二次 CE 抛射通道形成具有主序星和白矮星伴星的 sdB 星百分比, 第 13 列为双 He-WD 并合形成的 sdB 星百分比, 第 14 列为以上三个通道形成 sdB 星的样本总数。我们发现不同的模拟参数设置对不同类型 sdB 星的形成有较大影响, 接下来我们通过把模拟所得到的 sdB 星和观测上给出的不同类型 sdB 星轨道周期、质量等参数进行对比, 从而找到最佳模型。

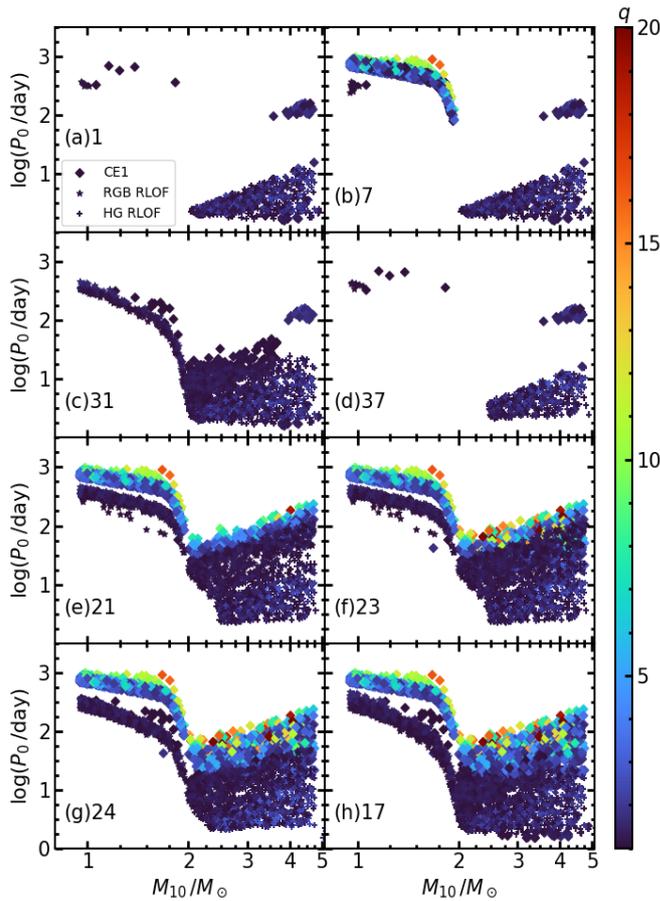


图 2 不同通道形成 sdB 星的主星初始质量与初始轨道周期分布。菱形、五角星以及加号分别表示通过第一次 CE 抛射、红巨星阶段以及赫氏空隙阶段的稳定 RLOF 通道形成 sdB 星的主星初始质量与初始轨道周期分布, 颜色棒表示主星和伴星的初始质量比。

我们在图 2 中展示了通过不同通道形成 sdB 星的主星初始质量与初始轨道周期分布。在

图 2 中我们并没有给出所有的模型，而是仅画出了对我们研究影响较大的 8 个模型，它们的详细参数设置参考表 2。本文的主要研究对象是温度低于 45,000 K 的 sdB 星，从图 2 中可以看到由于 sdB 星的有效温度被限制在 45,000 K 以下，因此形成 sdB 星的主星初始质量 M_{10} 几乎都小于 $5 M_{\odot}$ 。另外，由于模型 1、31 和 37 没有改变最小氦核燃烧质量，通过第一次 CE 抛射通道形成 sdB 星的诞生率比较低。模型 1、7 和 37 选用了原始 BSE 的稳定 RLOF 判据，它们无法通过红巨星阶段的稳定 RLOF 通道产生足够数量的 sdB 星。而模型 21、23、24 和 17 则可以通过第一次 CE 抛射通道和稳定 RLOF 通道形成足够数量的 sdB 星，不同通道形成的 sdB 星详细数量参见表 2。

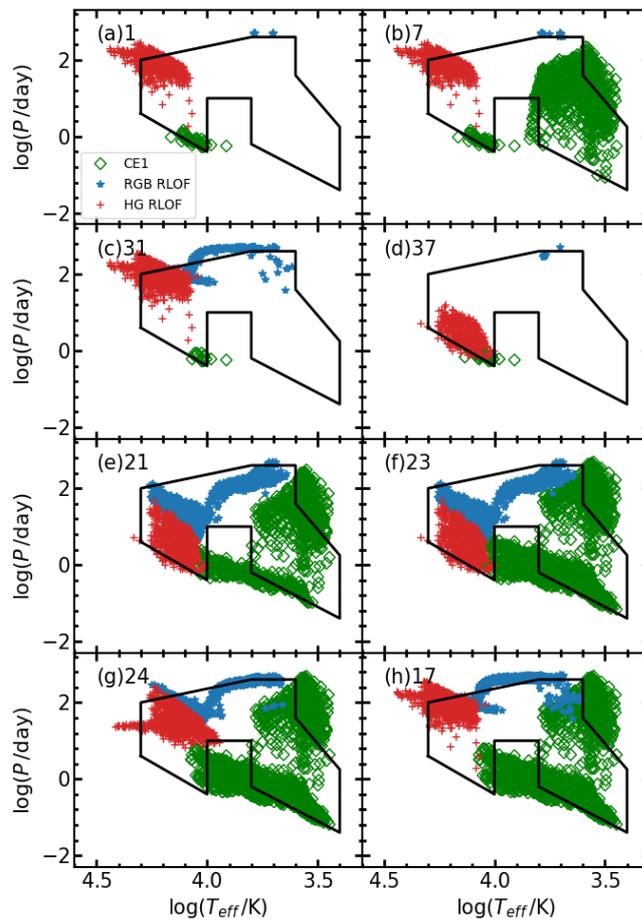


图 3 不同通道形成的 sdB 星主序伴星有效温度与轨道周期分布。绿色菱形、红色加号以及蓝色五角星表示通过第一次 CE 抛射通道、在赫氏空隙以及红巨星阶段进行稳定 RLOF 过程形成的 sdB 星伴星。黑色实线框是 Han 等人^[14] 给出的主序星伴星有效温度与轨道周期分布。

图 3 展示了通过不同通道形成 sdB 星的主序伴星有效温度与轨道周期分布，图 3 中的 8 组模型与图 2 中的模型一一对应。图 3 中黑色实线框为 Han 等人^[14] 最佳模型给出的 sdB

星主序伴星的有效温度与轨道周期分布。我们的模型 21、23、24 和 17 所得到的 sdB 星主序伴星有效温度与轨道周期分布和他们的结果近似一致。Vos 等人^[40]在其图 3 中给出了他们通过长期观测所得到的一些长轨道周期 sdB 星的轨道周期分布, 它们的轨道周期大约分布在 400 ~ 1600 d。通过将 Vos 等人^[40]的观测数据与图 3 中各个模型比较可以看出, 所有模型中通过稳定的 RLOF 通道形成 sdB 星的轨道周期分布都偏小, 而模型 17 所产生的长轨道周期 sdB 星的轨道周期分布更加接近 Vos 等人^[40]的观测数据。一方面由于 BSE 并不能详细计算物质转移过程, 很多物理机制可能并没有被考虑。另一方面 Chen 等人^[41]认为发生稳定的 RLOF 之前, 红巨星可能会首先发生大气层的物质转移, 在这种情况下 sdB 星的轨道周期将会增加大概 10%, 我们在 sdB 星的演化过程中并未考虑这种机制带来的影响。以上这些情况都可能使我们得到偏小的轨道周期分布。

Maxted 等人^[42]、Morales-Rueda 等人^[43]、Copperwheat 等人^[44]、Kupfer 等人^[45]和 Schaffenroth 等人^[33, 46]利用 sdB 星的视向速度变化曲线和光变曲线测定了一些密近 sdB 星双星系统的轨道周期和伴星最小质量, 它们的轨道周期大概分布在 0.1 ~ 10 d, 伴星最小质量大概分布在 0.05 ~ 0.50 M_{\odot} 之间。一般认为密近 sdB 星双星系统来源于 CE 抛射通道, 为了验证我们的计算结果并找到和观测数据相符的最佳模型, 在图 4 中我们将通过 CE 抛射通道形成的 sdB 星轨道周期与伴星最小质量分布和他们的观测数据进行了对比。其中我们利用和 Clausen 等人^[32]一样的方法计算 sdB 星伴星的最小质量, 首先假设 sdB 星双星系统的轨道倾角 i 在 0 ~ 90° 之间随机分布, 然后通过公式 $M_2 \sin^3 i$ 计算得到伴星的最小质量。值得注意的是第一次 CE 抛射通道主要形成伴星为主序星的 sdB 星, 第二次 CE 抛射通道主要形成伴星为白矮星的 sdB 星。我们发现模型 1、31 和 37 中通过 CE 抛射通道形成的 sdB 星的轨道周期和观测数据相比偏小, 模型 7 中通过第一次 CE 抛射通道形成的伴星为主序星的 sdB 星轨道周期偏大, 模型 21 中通过第二次 CE 抛射通道形成的伴星为白矮星的 sdB 星轨道周期分布偏小。而模型 23、24 和 17 和观测数据符合的较好。结合前文得出的结论表明模型 17 能够较好地解释观测。

3.2 sdB 星质量分布

质量是 sdB 星的一个重要参数, 它对于判断 sdB 星的形成和演化历史具有很重要的帮助。Han 等人^[14]发现来自于不同形成通道的 sdB 星具有不同的质量分布。其中通过稳定的 RLOF 通道和通过 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量在 0.30 ~ 0.80 M_{\odot} 之间分布, 并且通过这两种通道形成的 sdB 星质量分布在 0.40 ~ 0.50 M_{\odot} 之间有一个明显的峰值。通过双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量在 0.40 ~ 0.65 M_{\odot} 之间有一个较平坦的分布, 其质量分布峰值在 0.50 ~ 0.60 M_{\odot} 之间。图 5 展示了我们以上 8 个模型形成的 sdB 星质量分布。红色、绿色和蓝色的实线分别展示了通过稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布, 黑色的实线代表通过以上三种通道形成的所有 sdB 星的质量分布。模型 1、7、31 和 37 只能产生少量的 sdB 星, 它们的质量分布和 Han 等人^[14]的结果不一致。模型 21 通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布在 0.40 ~ 0.50 M_{\odot} 之间并没有一个特别突出的峰值, 模型 23 和 24 通过双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布峰值都在 0.40 ~ 0.50 M_{\odot} 之间, 它们也都和 Han 等人^[14]的结果不一致。模型 17 中

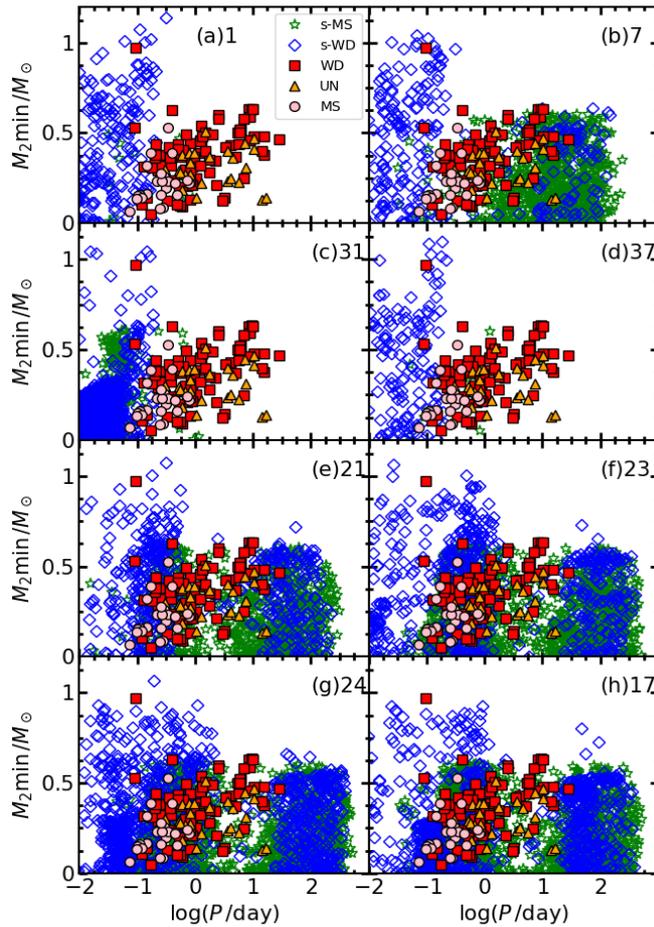


图 4 通过 CE 抛射通道形成的 sdB 星轨道周期与伴星最小质量分布。蓝色菱形与绿色五角星分别表示我们计算结果中伴星为白矮星与主序星的 sdB 星轨道周期与伴星最小质量分布，红色正方形、粉色圆形以及橙色三角形分别表示 sdB 星伴星为白矮星、主序星以及未知类型恒星的观测数据分布。观测数据来自 Maxted 等人^[42]、Morales-Rueda 等人^[43]、Copperwheat 等人^[44]、Kupfer 等人^[45]和 Schaffenroth 等人^[33, 46]。

较多数量的 sdB 星可以产生，并且通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布在 $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$ 之间有一个明显的峰值，通过双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布峰值大概在 $0.50 \sim 0.60 M_{\odot}$ 之间。模型 17 中通过各个通道形成的 sdB 星的质量分布与 Han 等人^[14]的结果基本一致。同时结合前文得出的结论表明模型 17 是我们的最佳模型。

Lei 等人^[47]利用 LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope) 光谱给出了 664 颗单线光谱热亚矮星的质量分布，其中 483 颗为 sdB 星。他们的计算结果表明 sdB 星的质量在 $0.10 \sim 1.0 M_{\odot}$ 之间广泛分布。同时根据 sdB 星的视差测量精度

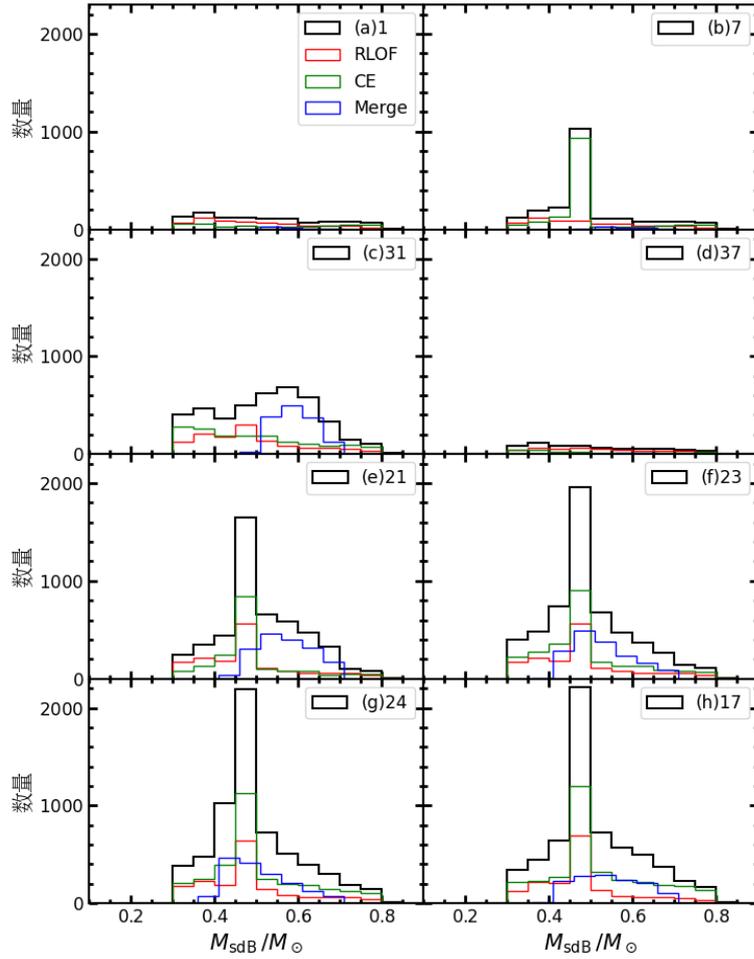


图 5 不同模型中双星演化形成的 sdB 星质量分布。红色的实线表示稳定的 RLOF 通道形成的 sdB 星质量分布, 绿色的实线表示 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布, 蓝色的实线表示双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布, 黑色的实线表示以上三种通道形成的 sdB 星整体质量分布。

σ_{ω}/ω , 他们将 sdB 星的质量计算结果分为三组去统计它们的质量分布。其中 $\sigma_{\omega}/\omega \leq 0.2$ 的 sdB 星为第一组, 具有 $\sigma_{\omega}/\omega \leq 0.1$ 的 sdB 星为第二组, $\sigma_{\omega}/\omega \leq 0.05$ 的 sdB 星为第三组。考虑第三组 sdB 星具有更高的视差测量精度, 因此它们具有更加可靠的质量测定。在图 6 中, 我们将模型 17 通过所有通道形成的 sdB 星质量分布和 Lei 等人^[47] 第三组中 220 颗 sdB 星的质量分布做了简要对比。我们样本的质量分布在 $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$ 之间有一个明显的峰值, 这和 Lei 等人^[47] 的结果较为符合。此外, 我们的样本中质量大于 $0.50 M_{\odot}$ 的 sdB 星比 Lei 等人^[47] 的 sdB 星数量要少。这可能是因为只考虑了通过双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星, 像氦白矮星并合小质量主序星等并合通道也可能会形成质量大于 $0.50 M_{\odot}$ 的 sdB 星, 但我们并没有考虑这些可能的形成通道。我们样本中质量小于 $0.45 M_{\odot}$ 的

sdB 星也比 Lei 等人 [47] 的 sdB 星数量少。一方面可能是由于我们的样本中只包含 sdB 星, 而 Lei 等人 [47] 的样本中可能包含一部分大气参数和 sdB 星很像的小质量氦白矮星前身星。通过光谱和大气参数很难将它们和和 sdB 星区分开。另一方面对于质量在 $1.4 \sim 2.0 M_{\odot}$ 的主序星, 我们得到了比 Han 等人 [1] 更大的 M_c^{tip} 和 M_c^{min} , 这也会造成我们样本中质量小于 $0.45 M_{\odot}$ 的 sdB 星数量偏少。

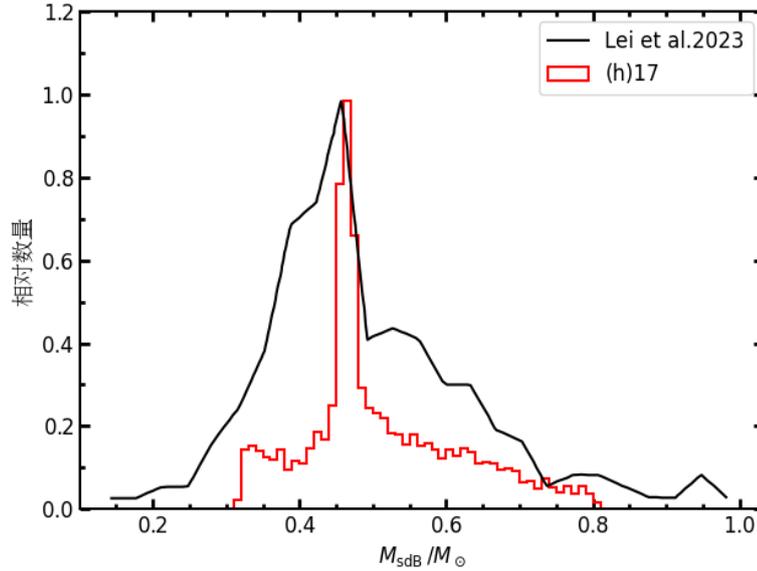


图 6 模型 17 所得到的 sdB 星和 Lei 等人 [47] 中 sdB 星的质量分布对比。其中最多质量分布区间的数量被归一化为 1, 其它区间的分布按照最大数量归一化的方式进行归一化。红色的实线表示模型 17 的 sdB 星质量分布, 黑色实线表示 Lei 等人 [47] 利用 LAMOST 光谱计算得到的 sdB 星质量分布。

4 讨论与总结

4.1 氢壳层对 sdB 星模拟特征的影响

通过 BSE 得到的 sdB 星由于其算法本身存在的缺陷, 因此并不能完全模拟出 sdB 星的所有特征, 特别是通过 BSE 得到的 sdB 星只是一个裸氦核, 并不具有氢壳层。在图 7 中我们给出了质量范围为 $0.35 \sim 0.75 M_{\odot}$ 的 sdB 星的演化轨迹和和观测数据在 $T_{\text{eff}} - \log g$ 图上的分布。其中黑色的实线代表通过 BSE 得到的不同质量 sdB 星演化轨迹, 黑色的圆圈代表观测数据。从图 7 可以看出, 质量越大的 sdB 星有效温度越高, 这是由于质量更大的 sdB 星具有更大的氦核燃烧区以及更高的产能率。而没有氢壳层的 sdB 星的演化轨迹和观测数据相比位于有效温度更高以及重力加速度更大的位置。这是因为观测数据都具有一个小质量的氢壳层, 而氢壳层的出现会使 sdB 星的不透明度增加, 不透明度的增加会使中心氦核燃烧

产生的光子穿透到表面的数目减少, 因此其有效温度减小。另外, 具有氢壳层的 sdB 星半径会更大, 从而导致它们的重力加速度比没有氢壳层的 sdB 星更小。

为了更加详细研究不同质量氢壳层对于 sdB 星在 $T_{\text{eff}} - \log g$ 图上演化轨迹的影响, 我们利用 MESA 程序计算了具有和 BSE 一样氦核质量且具有氢壳层为 $0.001 M_{\odot}$ 和 $0.01 M_{\odot}$ 的 sdB 星演化轨迹。如图 7 所示, 随着氢壳层质量的增加, 利用 MESA 程序计算得到的 sdB 星有效温度和重力加速度逐渐减小, 大部分观测数据都位于具有氢壳层的 sdB 星演化轨迹之上。因此在考虑了不同质量氢壳层对于 sdB 星带来的影响后, 我们认为 BSE 模拟的 sdB 星在 $T_{\text{eff}} - \log g$ 图上会有观测数据近似一致的分布。并且大部分观测数据分布在 $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$ 的 sdB 星演化轨迹之间, 这和我们之前得到的 sdB 星的质量分布相一致。同时在 BSE 中我们将没有氢壳层的氦主序星作为 sdB 星, 由于 sdB 星氢壳层质量很小, 这一设置也并不会显著影响最终形成的 sdB 星质量和轨道周期等分布。

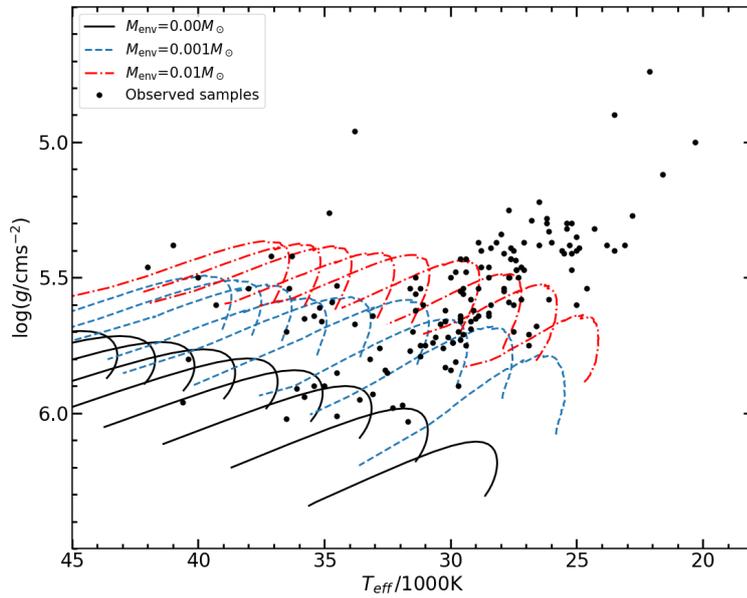


图 7 sdB 星演化轨迹和观测数据的有效温度与重力加速度分布。黑色实线表示 BSE 给出的没有氢壳层的 sdB 星演化轨迹, 蓝色虚线和红色点虚线表示通过 MESA 程序计算得到的氢壳层质量分别为 $0.001 M_{\odot}$ 和 $0.01 M_{\odot}$ 的 sdB 星演化轨迹。每组从右到左的曲线分别表示氦核质量为 0.35 、 0.40 、 0.45 、 0.50 、 0.55 、 0.60 、 0.65 、 0.70 和 $0.75 M_{\odot}$ 的 sdB 星演化轨迹。黑色圆点为 Maxted 等人^[42]、Morales-Rueda 等人^[43]、Copperwheat 等人^[44] 和 Kupfer 等人^[45] 的 sdB 星观测数据。

4.2 总结

我们通过修改 BSE 参数设置成功得到了双星中稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合三种通道形成 sdB 星的参数空间分布, 并将我们所得的演化数据和观测数据进行了对比, 主要结论如下:

- (1) 修改 BSE 参数设置之后可以通过双星中稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并

合通道形成一定数量的 sdB 星。

(2) 通过 BSE 得到的 sdB 星有效温度分布在 25000 ~ 45000 K 之间, 重力加速度分布在 $5.5 \sim 6.5 \text{ cm/s}^2$ 之间。由于利用 BSE 得到的 sdB 星没有氢壳层, 我们结合通过 MESA 演化程序得到的具有不同质量氢壳层 sdB 星的演化轨迹, 在考虑氢壳层带来的影响后可以基本解释观测上给出的 sdB 星在 $T_{\text{eff}} - \log g$ 图上的分布。

(3) 模型 17 给出的伴星为白矮星和主序星的 sdB 星轨道周期分布一定程度上也能够解释 sdB 星观测数据的轨道周期分布。

(4) 模型 17 得到的 sdB 星质量分布在 $0.30 \sim 0.80 M_{\odot}$ 之间。其中, 稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布在 $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$ 之间有一个明显峰值, 双 He-WD 并合形成的 sdB 星质量分布峰值在 $0.50 \sim 0.60 M_{\odot}$ 之间, 它们的质量分布和前人的研究结果基本一致, 并且一定程度上能够解释 sdB 星观测数据的质量分布。我们最终选择模型 17 为最佳模型。

参考文献:

- [1] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2002, 336(2): 449
- [2] Dale D A, Gil de Paz A, Gordon K D, et al. ApJ, 2007, 655(2): 863
- [3] Zhang F, Li L, Zhang Y, et al. MNRAS, 2012, 421(1): 743
- [4] Zhang F, Li L, Han Z, et al. MNRAS, 2013, 428(4): 3390
- [5] Kupfer T, Ramsay G, van Roestel J, et al. ApJ, 2017, 851(1): 28
- [6] Geier S. A&A, 2013, 549: A110
- [7] Németh P, Vos J, Molina F, et al. A&A, 2021, 653: A3
- [8] Ferguson D H, Green R F, Liebert J. ApJ, 1984, 287: 320
- [9] Allard F, Wesemael F, Fontaine G, et al. AJ, 1994, 107: 1565
- [10] Thejll P, Ulla A, MacDonald J. A&A, 1995, 303: 773
- [11] Ulla A, Thejll P. A&AS, 1998, 132: 1
- [12] Aznar Cuadrado R, Jeffery C S. A&A, 2001, 368: 994
- [13] Pelisoli I, Vos J, Geier S, et al. A&A, 2020, 642: A180
- [14] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2003, 341(2): 669
- [15] Yu S, Li L. A&A, 2009, 503(1): 151
- [16] Hernández-Pérez F, Bruzual G. MNRAS, 2013, 431(3): 2612
- [17] Vos J, Vučković M, Chen X, et al. MNRAS, 2019, 482(4): 4592
- [18] Vos J, Bobrick A, Vučković M. A&A, 2020, 641: A163
- [19] Xiong H, Chen X, Podsiadlowski P, et al. A&A, 2017, 599: A54
- [20] Kramer M, Schneider F R N, Ohlmann S T, et al. A&A, 2020, 642: A97
- [21] Ge H, Tout C A, Chen X, et al. ApJ, 2022, 933(2): 137
- [22] Ge H, Tout C A, Webbink R F, et al. ApJ, 2024, 961(2): 202
- [23] Li Z, Zhang Y, Chen H, et al. ApJ, 2024, 964(1): 22
- [24] Webbink R F. ApJ, 1984, 277: 355
- [25] Iben J, ICKO. ApJ, 1990, 353: 215
- [26] Saio H, Jeffery C S. MNRAS, 2000, 313(4): 671
- [27] Zhang X, Jeffery C S. MNRAS, 2012, 419(1): 452
- [28] Vos J, Pelisoli I, Budaj J, et al. A&A, 2021, 655: A43

- [29] Heber U. *ARA&A*, 2009, 47(1): 211
- [30] Heber U. *PASP*, 2016, 128(966): 082001
- [31] Arancibia-Rojas E, Zorotovic M, Vučković M, et al. *MNRAS*, 2024, 527(4): 11184–11197
- [32] Clausen D, Wade R A, Kopparapu R K, et al. *ApJ*, 2012, 746(2): 186
- [33] Schaffenroth V, Pelisoli I, Barlow B N, et al. *A&A*, 2022, 666: A182
- [34] Hurley J R, Pols O R, Tout C A. *MNRAS*, 2000, 315(3): 543
- [35] Hurley J R, Tout C A, Pols O R. *MNRAS*, 2002, 329(4): 897
- [36] Kroupa P, Tout C A, Gilmore G. *MNRAS*, 1993, 262: 545–587
- [37] Mazeh T, Goldberg D, Duquennoy A, et al. *ApJ*, 1992, 401: 265
- [38] Shatsky N, Tokovinin A. *A&A*, 2002, 382: 92
- [39] Han Z, Podsiadlowski P, Eggleton P P. *MNRAS*, 1995, 272(4): 800
- [40] Vos J, Vučković M, Chen X, et al. *MNRAS*, 2019, 482(4): 4592
- [41] Chen X, Han Z, Deca J, et al. *MNRAS*, 2013, 434(1): 186–193
- [42] Maxted P F L, Heber U, Marsh T R, et al. *MNRAS*, 2001, 326(4): 1391
- [43] Morales-Rueda L, Maxted P F L, Marsh T R, et al. *MNRAS*, 2003, 338(3): 752
- [44] Copperwheat C M, Morales-Rueda L, Marsh T R, et al. *MNRAS*, 2011, 415(2): 1381
- [45] Kupfer T, Geier S, Heber U, et al. *A&A*, 2015, 576: A44
- [46] Schaffenroth V, Barlow B N, Pelisoli I, et al. *A&A*, 2023, 673: A90
- [47] Lei Z, He R, Németh P, et al. *ApJ*, 2023, 953(2): 122

Study of hot subdwarf-B stars through the BSE algorithm

WANG Xiao-gang^{1,2}, ZHANG Feng-hui^{1,3,4}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650216, PR China 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, PR China 3. Key Laboratory for structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Science, Kunming 650216, PR China 4. International Centre of Supernovae, Yunnan Key Laboratory, Kunming 650216, PR China)

Abstract: Hot subdwarf-B stars are helium-core burning objects with extremely thin hydrogen envelopes. They are generally believed to formed through binary interactions, and play an important role for studying the history of binary evolution. By modifying the fast binary evolution algorithm, the stable Roche lobe overflow, common-envelope ejection, and double helium white dwarfs merger channels for the formation of hot subdwarf-B stars in binary systems were studied. Meanwhile, the parameter space for producing hot subdwarf-B stars was provided by calculating 42 sets of binary systems with different initial parameters. The model 17 in this work can roughly reproduce the orbital period of hot subdwarf-B stars with tight/wide orbit. In addition, the mass distributions of hot subdwarf-B stars formed through the stable Roche lobe overflow and common-envelope ejection channels have sharp peak at $0.40 \sim 0.50 M_{\odot}$, while the double helium white dwarfs merger channels has mass peak at $0.50 \sim 0.60 M_{\odot}$. The simulated mass distributions are generally consistent with the

pervious theoretical predictions and observations. Therefore, the model 17 is considered to be the best set in all of 42 models.

Key words: hot subdwarf-B stars; periods; mass