

The Effects of α -Enhancement on the Evolution of EHB Stars

Jianpo Guo^{1,2}, Gen Ye^{1,2}, Zuozhao Xiong¹

¹Department of Science and Technology, Puer University, Puer Yunnan

²Open Key Laboratory of Mechanics in Yunnan Province, Puer Yunnan

Email: guojianpo1982@hotmail.com

Received: Jan. 12th, 2016; accepted: Jan. 26th, 2016; published: Jan. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Analyses of metal elements have shown α -enhanced phenomenon in some globular clusters of the Milky Way and in some elliptical galaxies. Extreme horizontal branch (EHB) stars are helium burning objects with especially thin hydrogen envelopes. We study the effects of α -enhancement on the evolution of EHB stars, using Eggleton's code. We calculate the evolution of EHB stars with metallicities 0.001, 0.004, 0.02 and 0.04, core masses 0.400, 0.450, 0.475, 0.500 and 0.550 M_{\odot} , and envelope masses 0.001, 0.005, 0.010, 0.015 and 0.020 M_{\odot} . It is found that α -enhancement can raise effective temperatures, surface gravities and luminosities, and shorten evolutionary lifetime for EHB stars. The higher values their metallicities are, the more obvious the α -enhanced effects are; and the thicker their envelopes are, the more obvious the α -enhanced effects are.

Keywords

Stellar Evolution, Elemental Abundances, Horizontal Branch

α 增丰对极端水平分支星的影响

郭建坡^{1,2}, 叶 根^{1,2}, 熊作朝¹

¹普洱学院理工学院, 云南 普洱

²云南省高校力学开放重点实验室, 云南 普洱

Email: guojianpo1982@hotmail.com

收稿日期：2016年1月12日；录用日期：2016年1月26日；发布日期：2016年1月29日

摘要

金属元素分析表明：在银河系的球状星团和椭圆星系中，普遍存在 α 增丰现象。极端水平分支星是一种处在氦燃烧阶段的天体，它们具有非常薄的氢包层。我们用Eggleton's恒星演化程序，研究了 α 增丰对极端水平分支星的影响。我们计算了不同金属丰度、不同核心质量和不同包层质量的极端水平分支星的演化；金属丰度取0.001、0.004、0.02和0.04，核心质量取0.400、0.450、0.475、0.500和0.550 M_{\odot} ，包层质量取0.001、0.005、0.010、0.015和0.020 M_{\odot} 。通过研究发现， α 增丰可以使极端水平分支星的有效温度升高，表面重力加速度和光度增大，演化寿命变短。金属丰度越大， α 增丰效应越明显；包层越厚， α 增丰效应越明显。

关键词

恒星演化，元素丰度，水平分支

1. 引言

20多年以前，当人们在研究恒星、星团和星系的演化时，都采用太阳金属元素混合模式，也就是认为它们的各种金属元素之间的相对比例与太阳表面的各种金属元素之间的相对比例完全相同。可是观测表明，太阳金属元素混合模式并不是在所有情况下都适用[1]-[5]。最近20多年来，很多学者都在研究这个课题[6]-[10]。 $[\alpha/\text{Fe}]$ 可以很好地描述金属元素混合模式的不同，现在已经被广泛地认可。在 $[\alpha/\text{Fe}]$ 中， α 代表 α 元素，包括氧、氦、镁、硅、硫、氩、钙和钛元素[11]；Fe并不仅仅代表铁元素，而是代表所有的铁峰元素，包括铬、锰、铁、钴、镍、铜和锌元素[12]。 α 元素主要是在II型超新星爆炸的过程中产生的，而铁峰元素主要是在Ia型超新星爆炸的过程中产生的[13] [14]。对于标准太阳金属元素混合模式来说， $[\alpha/\text{Fe}] = 0$ 。而当 $[\alpha/\text{Fe}] > 0$ 时，这种金属元素混合模式就称为 α 增丰模式。

观测表明，银河系核球和晕中的球状星团普遍存在 α 增丰现象[13] [15] [16]；巨椭圆星系中也普遍存在 α 增丰现象[17]-[19]。以前，人们认为总金属丰度一定的情况下，不同金属元素之间的丰度差异并不重要，因为氢和氦是气体的主要成分。但是这种假设并不一定正确，因为不同金属元素对气体总的不透明度(吸收系数)的贡献大不相同[20]。恒星结构和演化理论表明不透明度的变化会影响恒星的物理量(例如有效温度、光度、核心温度、产能率)和演化进程[21] [22]。不同金属元素之间的丰度差异会引起不透明度的变化，进而会影响恒星的结构和演化。所以，在研究恒星结构和演化时，很有必要考虑不同金属元素之间的丰度差异。

极端水平分支星是处在核心氦燃烧阶段的天体，具有非常薄的富氢包层；氢包层的质量一般小于0.02 M_{\odot} ，有效温度介于20,000到80,000 K [23] [24]。极端水平分支星的核心质量一般介于0.40至0.55 M_{\odot} ，典型的核质量是0.475 M_{\odot} [25]。在观测上，一般认为极端水平分支星是比天琴座RR变星空隙更蓝的天体[26] [27]。极端水平分支星在好几个方面都是重要的天体；例如，脉冲极端水平分支星可以用作距离测量的标准烛光[28]，一个极端水平分支星和一个大质量白矮星组成的双星系统可能成为Ia型超新星的前身星[29] [30]；极端水平分支星是很多星系中的远紫外光的重要来源[31]，可以成功地用来解释很多椭圆星系中的“紫外翻转”现象[32] [33]。极端水平分支星是一种重要的天体，观测也表明 α 增丰现象普遍存在；所以很有必要研究 α 增丰对极端水平分支星的影响，进而可以更好地研究星团和星系的演化。

2. 研究方法

2.1. 恒星演化程序中的物理输入

我们用 1995 版的 Eggleton's 恒星演化程序来计算恒星演化, 获取恒星演化数据[34]-[39]。我们采用的对流超射系数为 0.12 [40] [41]。初始氢丰度和金属丰度的定量关系, 我们采用 $X = 0.76 - 3.00Z$, 这是 Pols 等人通过观测银河系内大量不同金属丰度恒星的氢丰度和氦丰度, 而给出的经验公式[39]。我们用 OPAL 高温不透明度表[42] [43]和 Wichita 大学低温不透明度表[44]编译了与 Eggleton's 恒星演化程序相匹配的不透明度表[45] [46]。

我们采用 Grevesse 与 Sauval (1998)标准太阳金属元素混合模式(下文缩写为 GS98 标准太阳模式) [47]。Grevesse 与 Sauval 的团队多年来一直通过观测和实验对比来研究太阳表面的各种化学元素的含量, 他们的研究成果在恒星演化理论得到了广泛的认可和引用。我们采用 Salaris 与 Weiss (1998) α 增丰金属元素混合模式(下文缩写为 SW98 α 增丰模式) [48]。SW98 α 增丰模式是根据 3 个银盘上的球状星团和 28 个银晕中的星团的金属元素混合模式的观测数据得到的, $[\alpha/\text{Fe}]$ 的值等于 0.49。GS98 标准太阳模式和 SW98 α 增丰模式的具体数据详见表 1。

Table 1. Metal relative number fractions and mass fractions in the GS98 scaled-solar model and the SW98 α -enhanced model.

表 1. GS98 标准太阳模式和 SW98 α 增丰模式的金属元素相对数丰度和相对质量丰度

金属元素	标准太阳模式 相对数丰度	标准太阳模式 相对质量丰度	α 增丰模式 相对数丰度	α 增丰模式 相对质量丰度
C	0.246023	0.172062	0.108345	0.076535
N	0.061798	0.050417	0.028507	0.023483
O	0.502315	0.468017	0.715919	0.673656
Ne	0.089326	0.104970	0.069963	0.083031
Na	0.001552	0.002078	0.000653	0.000883
Mg	0.028247	0.039988	0.029170	0.041697
Al	0.002296	0.003607	0.001001	0.001589
Si	0.026976	0.044126	0.021623	0.035717
P	0.000270	0.000487	0.000086	0.000157
S	0.011775	0.021991	0.010592	0.019972
Cl	0.000142	0.000292	0.000096	0.000201
Ar	0.001866	0.004342	0.001011	0.002375
K	0.000100	0.000228	0.000040	0.000093
Ca	0.001663	0.003882	0.002212	0.005215
Ti	0.000065	0.000181	0.000136	0.000384
Cr	0.000364	0.001102	0.000143	0.000437
Mn	0.000252	0.000805	0.000075	0.000242
Fe	0.023495	0.076413	0.009882	0.032459
Ni	0.001321	0.004517	0.000543	0.001874

2.2. 构建零龄极端水平分支星的演化模型

极端水平分支星演化模型很难通过主序星的正常演化来得到，需要通过专门的方法来构建。我们采用张先飞等人(2009)类似的方法[25]来构建零龄极端水平分支星演化模型，具体步骤如下。第一步，我们让一个质量为 $2.5 M_{\odot}$ 的中等质量恒星正常地演化到红巨星底部，这时恒星中心区的氢已经耗尽，而中心区的氢燃烧还没有启动。而且，这时恒星的核心质量比较小，大约只有 $0.3 M_{\odot}$ 。第二步，这个中等质量恒星从红巨星底部开始正常演化，核心质量逐渐增大。第三步，当核心质量增长到特定的值时，我们关闭氢燃烧同时快速抛星风；在这个阶段，包层质量快速减少，而核心质量不变。第四步，当恒星总质量达到特定的值时，停止快速抛星风；这样就得到了一个零龄极端水平分支星的演化模型，而且具有特定的核心质量和包层质量。第五步，我们打开氢燃烧和氦燃烧，这颗恒星就开始了极端水平分支星的演化。

用这种方法，我们构建了一系列的零龄极端水平分支星演化模型；再运行这些零龄极端水平分支星演化模型，就得到了极端水平分支星的演化数据。我们一共计算了 200 颗极端水平分支星的演化，零龄极端水平分支星的网格构建如下：金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04，核心质量分别为 0.400、0.450、0.475、0.500 和 0.550 M_{\odot} ，包层质量分别为 0.001、0.005、0.010、0.015 和 0.020 M_{\odot} ，金属元素混合模式分别为 GS98 标准太阳模式和 SW98 α 增丰模式。

3. α 增丰对极端水平分支星的影响

3.1. α 增丰对不同金属丰度的极端水平分支星的影响

我们选取了 4 颗标准太阳模式的极端水平分支星和 4 颗 α 增丰模式的极端水平分支星来展示 α 增丰对不同金属丰度的极端水平分支星的影响。这 8 颗极端水平分支星具有相同的核心质量和包层质量，而金属丰度不同；核心质量为 0.475 M_{\odot} ，包层质量为 0.015 M_{\odot} ，金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04。

对于金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04 的标准太阳模式的极端水平分支星，当它们处在零龄极端水平分支时，有效温度分别为 34,085、29,807、25,590 和 23,522 K，表面重力加速度分别为 8501、5423、3002 和 2308 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，光度分别为 19.14、17.54、17.22 和 15.98 L_{\odot} 。而对于金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04 的 α 增丰模式的极端水平分支星，当它们处在零龄极端水平分支时，有效温度分别比标准太阳模式的高 201、682、1030 和 2140 K，表面重力加速度分别比标准太阳模式的大 2.2%、8.2%、12.1% 和 32.0%，光度分别比标准太阳模式的大 0.2%、1.2%、4.5% 和 7.3%。更直观地对比可见图 1~3。对于金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04 的标准太阳模式的极端水平分支星，它们的演化寿命分别为 1.611、1.691、1.690 和 1.736 亿年；而对于金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04 的 α 增丰模式的极端水平分支星，它们的演化寿命分别比标准太阳模式的短 0.1%、0.6%、2.5% 和 5.0%。可见， α 增丰可以使极端水平分支星变得更蓝、更亮、表面重力加速度增大，演化寿命缩短。而且金属丰度越大， α 增丰效应越明显。

物质吸收光子的能力用不透明度(吸收系数)来度量，不透明度的改变将会影响恒星的结构和演化[49][50]。极端水平分支星的核心温度极高，不透明度由电子散射主导， α 增丰的影响可以忽略不计。而在包层，不透明度由谱线吸收主导。众所周知，铁峰元素的吸收线非常强，而 α 增丰模式中含有较少的铁峰元素。所以， α 增丰可以使极端水平分支星包层的不透明度变小。包层的不透明度变小就意味着包层的温度梯度减小，核心温度和表面温度的差距变小；也就意味着表面温度升高。而表面温度就是有效温度，所以 α 增丰可以使极端水平分支星的有效温度升高，看起来更蓝。

包层的不透明度变小一方面会使有效温度升高，另一方面会让半径变小，而半径变小必然导致表面

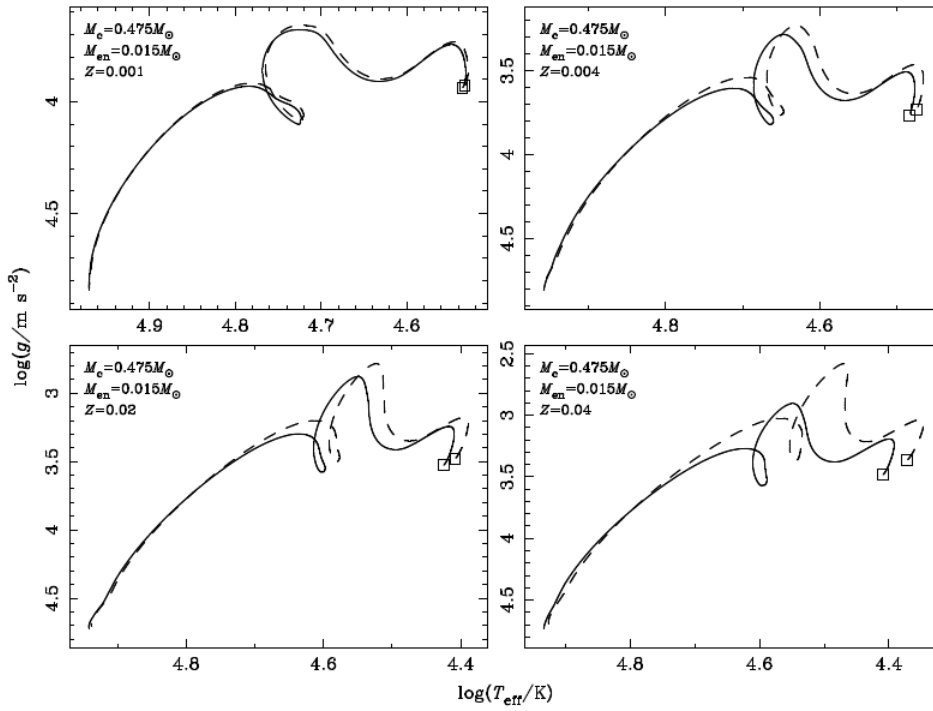


Figure 1. The effective temperature-gravity diagrams of EHB stars, with core masses $0.475 M_{\odot}$ and envelope masses $0.015 M_{\odot}$. The metallicities are 0.001, 0.004, 0.02 and 0.04, respectively. The dash lines denote the scaled-solar model and the solid lines denote the α -enhanced model. The hollow squares denote the zero age extreme horizontal branch (ZAEHB) phase

图 1. 极端水平分支星的有效温度 - 重力加速度图; 核心质量为 $0.475 M_{\odot}$, 包层质量为 $0.015 M_{\odot}$, 金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04。短划线代表标准太阳模式, 实线代表 α 增丰模式; 空心方块代表零龄极端水平分支阶段

重力加速度变大。半径变小会导致核心密度略微增加, 进而导致核心温度略微升高, 而核反应率对核心温度极端敏感, 所以核反应率会提高。而核反应率提高必然会导致光度增加, 演化进程加快。所以, α 增丰可以使极端水平分支星的表面重力加速度增大, 变得更亮, 演化地更快。金属丰度越大, 铁峰元素的绝对含量就会越多, 由 α 增丰引起的铁峰元素的绝对变化量就会增大, 包层不透明度的变化量就会变大, α 增丰效应就会越显著。

3.2. α 增丰对不同核心质量的极端水平分支星的影响

我们选取了 5 颗标准太阳模式的极端水平分支星和 5 颗 α 增丰模式的极端水平分支星来展示 α 增丰对不同核心质量的极端水平分支星的影响。这 10 颗极端水平分支星具有相同的金属丰度和包层质量, 而核心质量不同: 金属丰度为 0.04, 包层质量为 $0.010 M_{\odot}$, 核心质量分别为 0.400 、 0.450 、 0.450 、 0.475 、 0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 。

对于核心质量分别为 0.400 、 0.450 、 0.475 、 0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 的标准太阳模式的极端水平分支星, 当它们处在零龄极端水平分支时, 有效温度分别为 22,145、25,525、27,042、28,131 和 28,354 K, 表面重力加速度分别为 3531 、 4020 、 4211 、 4165 和 $3273 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 光度分别为 6.87、11.95、15.15、18.86 和 $27.20 L_{\odot}$ 。而对于核心质量分别为 0.400 、 0.450 、 0.475 、 0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 的 α 增丰模式的极端水平分支星, 当它们处在零龄极端水平分支时, 有效温度分别比标准太阳模式的高 852、2166、2139、2144 和 2286 K, 表面重力加速度分别比标准太阳模式的大 8.3%、29.2%、26.6%、25.3% 和 22.2%, 光度分别比标准太阳模式

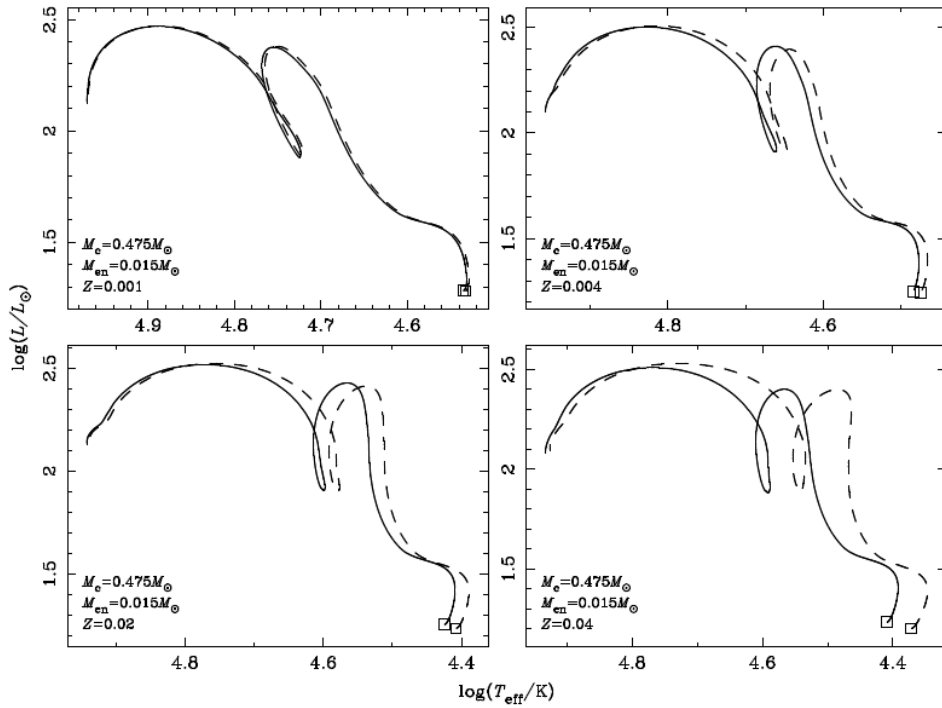
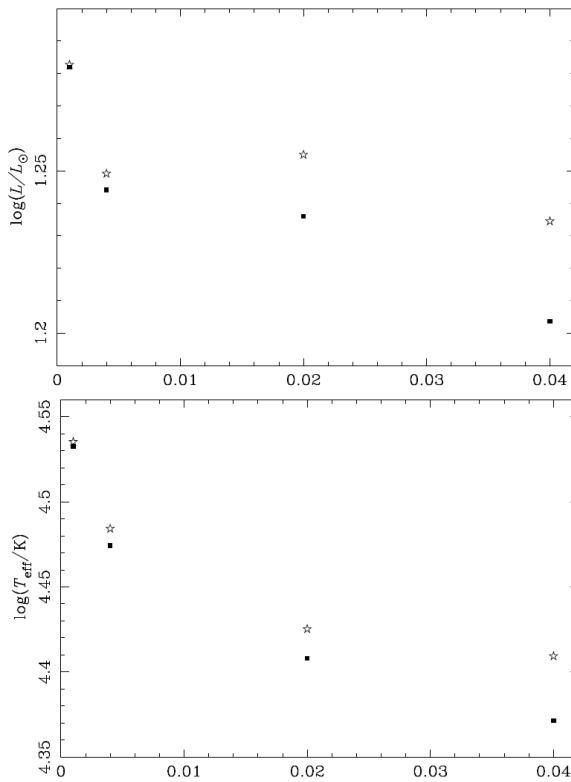


Figure 2. The effective temperature-luminosity diagrams of EHB stars, with core masses $0.475 M_{\odot}$ and envelope masses $0.015 M_{\odot}$. The metallicities are 0.001, 0.004, 0.02 and 0.04, respectively. The dash lines, the solid lines and the hollow squares have the same meanings as in Figure 1

图 2. 极端水平分支星的有效温度 - 光度图；核心质量为 $0.475 M_{\odot}$ ，包层质量为 $0.015 M_{\odot}$ ，金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04。短划线、实线和空心方块的涵义与图 1 相同



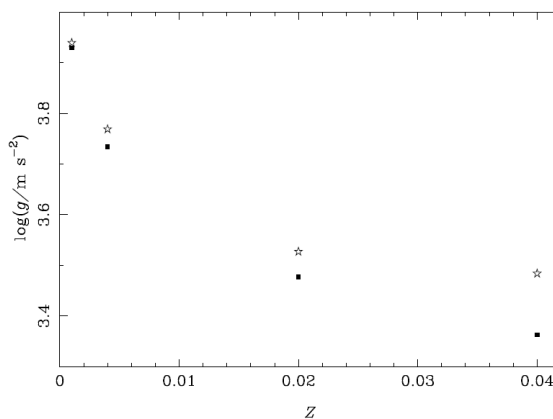


Figure 3. The luminosity-metallicity diagram, the effective temperature-metallicity diagram and the gravity-metallicity diagram of ZAEHB stars, with core masses $0.475 M_{\odot}$ and envelope masses $0.015 M_{\odot}$. The metallicities of are 0.001, 0.004, 0.02 and 0.04, respectively. The solid squares denote scaled-solar model and the hollow asterisks denote α -enhanced model

图 3. 零龄极端水平分支星的光度 - 金属丰度图、有效温度 - 金属丰度和重力加速度 - 金属丰度图；核心质量为 $0.475 M_{\odot}$ ，包层质量为 $0.015 M_{\odot}$ ，金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04。实心方块代表标准太阳模式，空心星号代表 α 增丰模式

的大 7.4%，7.2%，7.1%，7.0%，11.6%。

伴随着极端水平分支星的演化，中心区的氦元素会逐渐燃烧消耗，氦丰度会逐渐下降；当中心区的氦元素耗尽时，就进入氦壳层燃烧的演化阶段。对于核心质量分别为 0.400 、 0.450 、 0.475 、 0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 的标准太阳模式的极端水平分支星，当它们中心区的氦元素刚刚耗尽时，有效温度分别为 $32,001$ 、 $36,381$ 、 $38,538$ 、 $39,398$ 和 $37,383$ K，表面重力加速度分别为 1197 、 2177 、 2736 、 2933 和 2834 m s^{-2} 。而对于核心质量分别为 0.400 、 0.450 、 0.475 、 0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 的 α 增丰模式的极端水平分支星，当它们中心区的氦元素刚刚耗尽时，有效温度分别比标准太阳模式的高 141 、 3918 、 3280 、 3254 和 3837 K，表面重力加速度分别比标准太阳模式的大 5.9% 、 61.4% 、 51.4% 、 47.0% 和 32.7% 。可见， α 增丰效应并不随着核心质量的增大而单调递增，也不随着核心质量的减小而单调递减。更直观地对比可见图 4 和图 5。由于金属丰度为 0.04 ，包层质量为 $0.010 M_{\odot}$ ，核心质量为 $0.400 M_{\odot}$ 的标准太阳模式的极端水平分支星的演化轨迹存在异常的打转现象。这可能只是程序计算的结果，并不是真实的演化轨迹，为了避免误导读者，在图 4 中我们没有展示核心质量为 $0.400 M_{\odot}$ 的演化轨迹。

极端水平分支星的核心温度极其高，不透明度由电子散射主导， α 增丰的直接影响可以忽略不计。而在包层，不透明度由谱线吸收主导， α 增丰效应才会起作用。所以，当极端水平分支星的金属丰度和包层质量是特定值时， α 增丰引起的包层不透明度变化量也就基本确定了，该变化量并不会随着核心质量的增加而有显著变化。因而， α 增丰效应也就不会随着核心质量的增大而单调递增或者单调递减。

3.3. α 增丰对不同包层质量的极端水平分支星的影响

我们选取了 5 颗标准太阳模式的极端水平分支星和 5 颗 α 增丰模式的极端水平分支星来展示 α 增丰对不同包层质量的极端水平分支星的影响。这 10 颗极端水平分支星具有相同的金属丰度和核心质量，而包层质量不同；金属丰度为 0.004 ，核心质量为 $0.450 M_{\odot}$ ，包层质量分别为 0.001 、 0.005 、 0.010 、 0.015

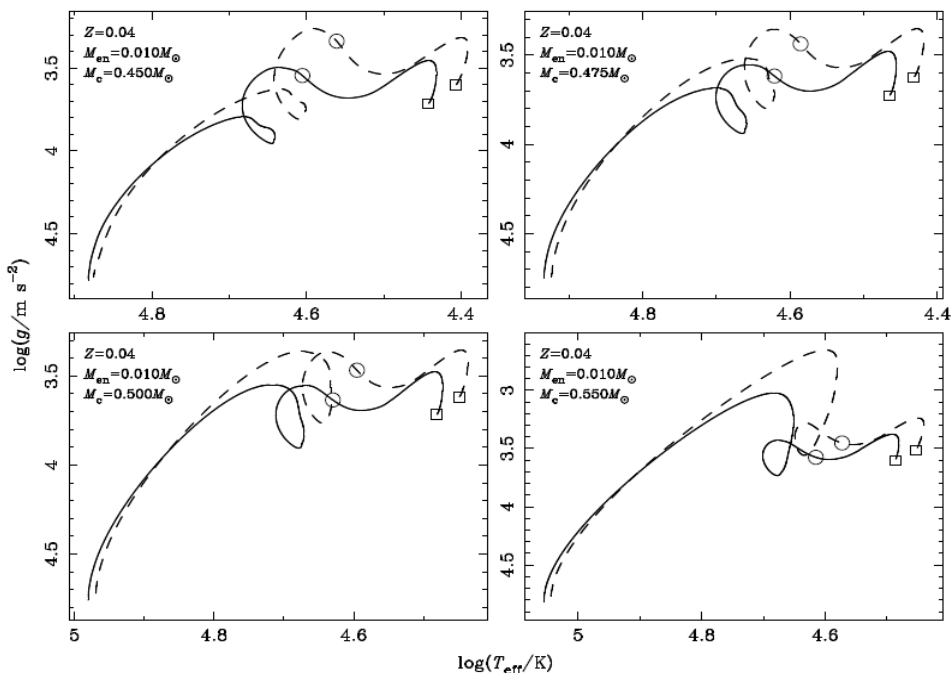
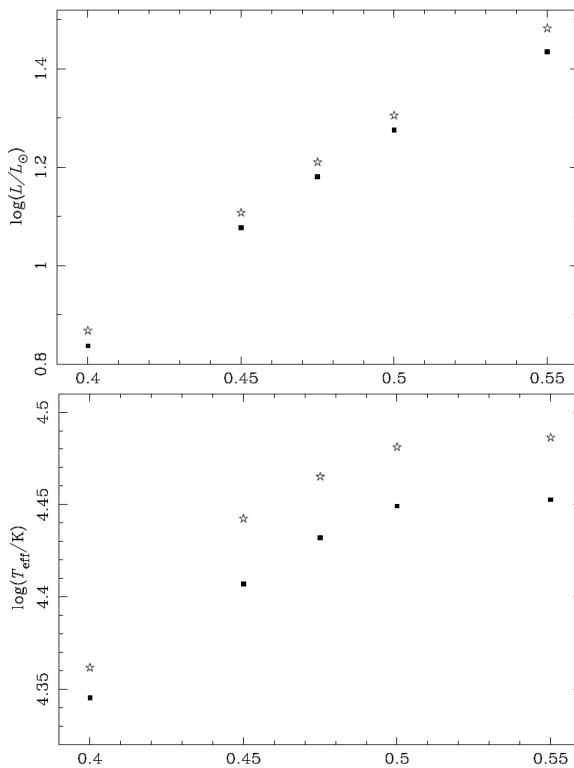


Figure 4. The effective temperature-gravity diagrams of EHB stars, with metallicities 0.04 and envelope masses $0.010 M_{\odot}$. The core masses are 0.450, 0.475, 0.500 and $0.550 M_{\odot}$, respectively. The dash lines, the solid lines and the hollow squares have the same meanings as in Figure 1. And the circles denote the evolutionary phase for the EHB stars, when the helium is exhausted in the center

图 4. 极端水平分支星的有效温度 - 重力加速度图; 金属丰度为 0.04, 包层质量为 $0.010 M_{\odot}$, 核心质量分别为 0.450、0.475、0.500 和 $0.550 M_{\odot}$ 。短划线、实线和空心方块的涵义与图 1 相同。圆圈代表中心区氦元素刚刚耗尽时的演化阶段



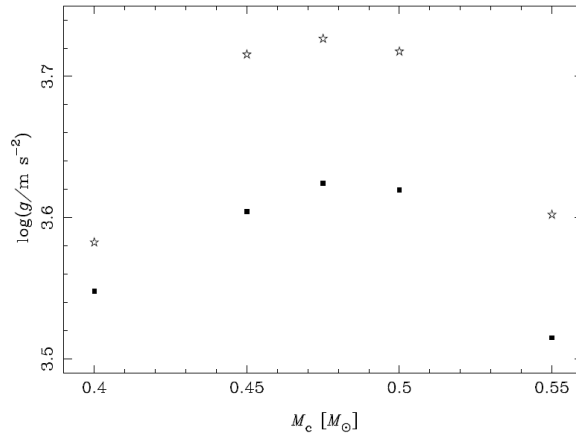


Figure 5. The luminosity-metallicity diagram, the effective temperature-metallicity diagram and the gravity-metallicity diagram of ZAEHB stars, with core masses $0.475 M_{\odot}$ and envelope masses $0.015 M_{\odot}$. The metallicities of are 0.001, 0.004, 0.02 and $0.04 M_{\odot}$, respectively. The solid squares denote scaled-solar model and the hollow asterisks denote α -enhanced model

图 5. 零龄极端水平分支星的光度-金属丰度图、有效温度-金属丰度和重力加速度-金属丰度图；核心质量为 $0.475 M_{\odot}$ ，包层质量为 $0.015 M_{\odot}$ ，金属丰度分别为 0.001、0.004、0.02 和 0.04。实心方块代表标准太阳模式，空心星号代表 α 增丰模式

和 $0.020 M_{\odot}$ 。

对于包层质量分别为 0.001、0.005、0.010、0.015 和 $0.020 M_{\odot}$ 的标准太阳模式的极端水平分支星，当它们处在零龄极端水平分支时，有效温度分别为 34,291、33,831、32,842、31,526 和 30,019 K，表面重力加速度分别为 12,249、11,129、9390、7581 和 $5938 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，光度分别为 12.52、13.17、14.02、14.91 和 $15.81 L_{\odot}$ 。而对于包层质量分别为 0.001、0.005、0.010、0.015 和 $0.020 M_{\odot}$ 的 α 增丰模式的极端水平分支星，当它们处在零龄极端水平分支时，有效温度分别比标准太阳模式的高 290、316、379、431 和 551 K，表面重力加速度分别比标准太阳模式的大 2.4%、2.8%、3.6%、4.5% 和 6.4%，光度分别比标准太阳模式的大 1.0%、0.9%、1.0%、1.0% 和 1.1%。整体来看，包层越厚， α 增丰效应越明显。更直观地对比可见图 6 和图 7。 α 增丰效应主要是在包层起作用，包层质量越大， α 增丰引起的包层不透明度变化量越大， α 增丰效应也就越显著。

4. 讨论

4.1. 其他标准太阳模式和 α 增丰模式

在我们的计算中，采用了 GS98 标准太阳模式和 SW98 α 增丰模式。如果采用其他标准太阳模式，金属元素的相对丰度会与 GS98 标准太阳模式存在产生一些差异，恒星演化数据可能会有一些差异。Vanden Berg *et al.* (2000) 采用了其他两种不同的 α 增丰模式， $[\alpha/\text{Fe}]=0.3$ 和 $[\alpha/\text{Fe}]=0.6$ ，而且 $[\alpha/\text{Fe}]=0.6$ 的 α 增丰模式的 α 增丰效应要更加明显一些， $[\alpha/\text{Fe}]$ 越大， α 增丰效应越明显[51]。

4.2. 部分极端水平分支星的表面重力加速度异常偏大的观测现象

通过欧洲南方天文台 Ia 型超新星前身星的巡天观测[52]，人们发现了一些特殊的极端水平分支星，它们的表面重力加速明显大于正常极端水平分支星的表面重力加速度[53]。而我们的研究表明 α 增丰

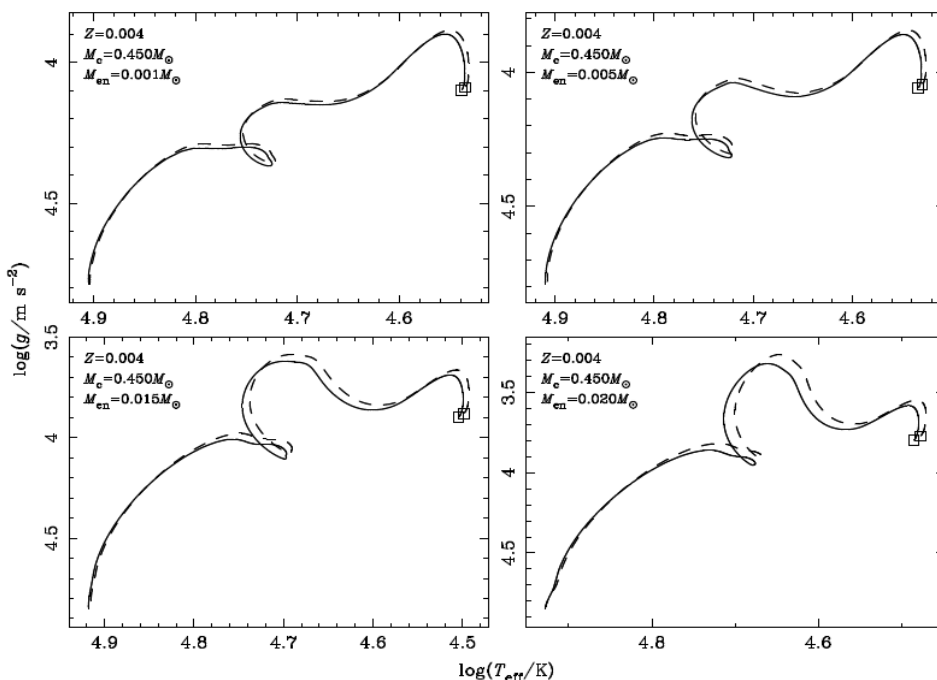
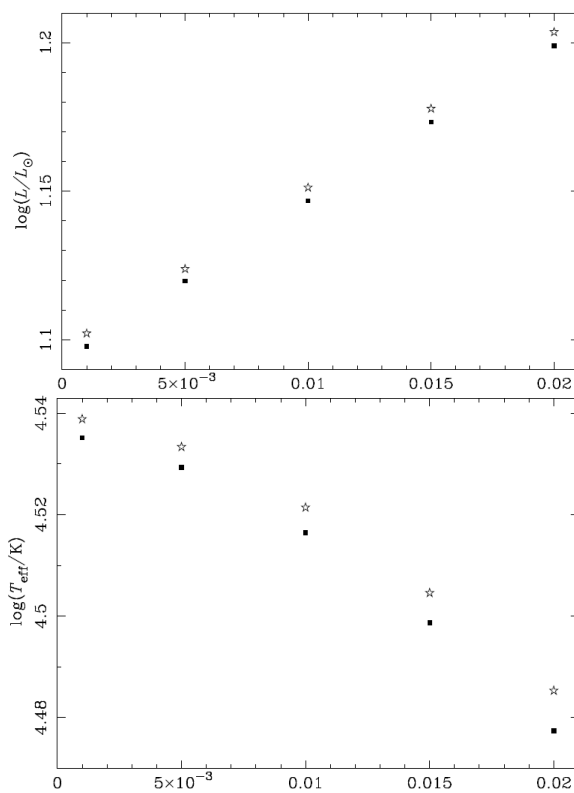


Figure 6. The effective temperature-gravity diagrams of EHB stars, with metallicities 0.004 and core masses $0.450 M_{\odot}$. The envelope masses are 0.001, 0.005, 0.015 and $0.020 M_{\odot}$, respectively. The dash lines, the solid lines and the hollowsquares have the same meanings as in Figure 1
图 6. 极端水平分支星的有效温度 - 重力加速度图;金属丰度为 0.04,核心质量为 $0.475 M_{\odot}$,包层质量分别为 0.001、0.005、0.015 和 $0.020 M_{\odot}$ 。短划线、实线和空心方块的涵义与图 1 相同



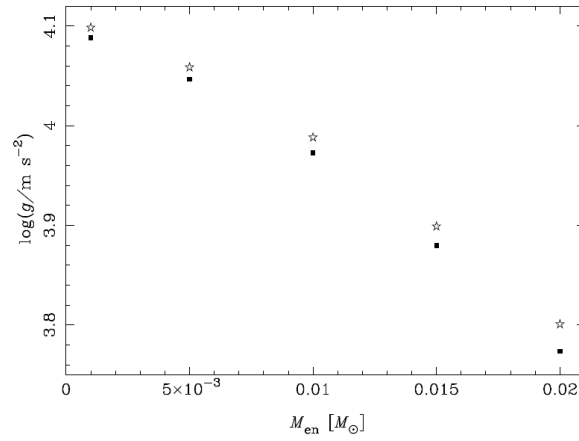


Figure 7. The luminosity-envelope mass diagram, the effective temperature-envelope mass diagram and the gravity-envelope mass diagram of ZAEHB stars, with metallicities 0.004 and core masses $0.450 M_{\odot}$. The envelope masses are 0.001, 0.005, 0.010, 0.015 and $0.020 M_{\odot}$, respectively. The solid squares denote the scaled-solar model and the hollow asterisks denote the α -enhanced model

图 7. 零龄极端水平分支星的光度 - 包层质量图、有效温度 - 包层质量和重力加速度 - 包层质量图；金属丰度为 0.004，核心质量为 $0.450 M_{\odot}$ 。包层质量分别为 0.001、0.005、0.010、0.015 和 $0.020 M_{\odot}$ ，实心方块代表标准太阳模式，空心星号代表 α 增丰模式

可以使极端水平分支星的表面重力加速度变大。所以，可以尝试用 α 增丰效应来解释这种极端水平分支星的表面重力加速度异常偏大的观测现象。

4.3. 球状星团的第二参数问题

关于球状星团的形态，有一个著名的第二参数问题；即两个金属丰度相似的星团(金属丰度一般被认为是球状星团形态的第一参数)，形态却大不相同[54]-[56]。M13 与 M3 球状星团就是第二参数问题的典型代表。一些观测表明 M13 与 M3 球状星团具有近似相等的金属丰度， $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.49$ [57] [58]。另一些观测表明 M13 与 M3 球状星团的金属丰度很接近，只是略有差异；M13 球状星团的金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.51$ ，而 M3 球状星团的金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.47$ [59]。虽然这两个球状星团的金属丰度近似相等或者非常接近，但是它们的形态却相差巨大，其中极端水平分支的形态差异最为显著[54] [60]。M13 球状星团中的极端水平分支星的数量远远多于 M3 球状星团中的极端水平分支星的数量。

很多因素被用来解释 M13 与 M3 球状星团的这种差异。例如，Rey *et al.* (2001)认为演化年龄的差异是主要因素[54]。然而，另一些学者却认为 M13 与 M3 演化年龄差异很小，不足以解释二者在极端水平分支的巨大差异[61] [62]。有些学者指出双星比例是关键因素[63] [64]。还有学者认为是氦增丰引起了这种巨大差异[26] [65]。上述观点都言之有据，但是很难确定究竟是哪个因素导致了 M13 与 M3 球状星团在极端水平分支的巨大差异。

我们认为，类似 M13 与 M3 球状星团的这种差异，可能是由于 α 增丰引起的。我们的研究表明 α 增丰可以使极端水平分支星的有效温度升高，这会直接导致球状星团的极端水平分支星变得更蓝。另一方面， α 增丰会改变球状星团的极端水平分支星的数量，理由如下。极端水平分支星并不是与生俱来的，而是由其前身星演化而来。它们的前身星在主序阶段也是普通恒星，只是在红巨星阶段由于种种原

因损失了过多的包层物质, 导致包层变得很薄而演化成了极端水平分支星。极端水平分支星的前身星在主序阶段也是正常演化的小质量恒星或者中等质量恒星, 它们的主序寿命可以长达几十亿年, 甚至上百亿年。而 α 增丰可以使恒星的主序寿命缩短大约 10%~20% [46]。因此, α 增丰可以使球状星团中的极端水平分支星提前出现大约几亿年, 甚至超过十亿年。这就意味着, 当标准太阳模式的球状星团很少有极端水平分支星出现的时候, 而 α 增丰模式的球状星团已经有大量极端水平分支星生成。在这一阶段, α 增丰模式的球状星团形态和标准太阳模式的球状星团形态, 看起来就会大不相同; 在极端水平分支的形态差异尤为显著。

基金项目

本项研究工作得到了云南省教育厅自然科学基金(基金号: 2012Y 和 2014Y)、普洱学院自然科学基金(基金号: K2015030)和国家自然科学基金(基金号: 11265012)的支持。

参考文献 (References)

- [1] Bencivenni D, Castellani V, Tornambe A, Weiss A. *ApJS*, 1989, 71: 109 <http://dx.doi.org/10.1086/191366>
- [2] Salaris M, Chieffi A, Straniero O. *ApJ*, 1993, 414: 580 <http://dx.doi.org/10.1086/173105>
- [3] Salasnich B, Girardi L, Weiss A, Chiosi C. *A&A*, 2000, 361: 1023
- [4] Boesgaard A M, Rich J A, Levesque E M, Bowler B P. *ApJ*, 2011, 743: 140 <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/140>
- [5] Caffau E, Bonifacio P, Francois P, et al. *A&A*, 2013, 560: 15
- [6] Bergbusch P A, Vandenberg D A. *ApJS*, 1992, 81: 163 <http://dx.doi.org/10.1086/191690>
- [7] Weiss A, Peletier R F, Matteucci F. *A&A*, 1995, 296: 73
- [8] Cassisi S, Salaris M, Castelli F, Pietrinferni A. *ApJ*, 2004, 616: 498 <http://dx.doi.org/10.1086/424907>
- [9] Lee H C, Worthey G, Dotter A. *ApJ*, 2009, 138: 1442
- [10] Rosa I G, Barbera F L, Ferreras I, Carvalho R R. *MNRAS*, 2011, 418: L74 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01146.x>
- [11] Pietrinferni A, Cassisi S, Salaris M, Castelli F. *ApJ*, 2006, 642: 797 <http://dx.doi.org/10.1086/501344>
- [12] Thomas D, Maraston C, Bender R. *MNRAS*, 2003, 339: 897 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06248.x>
- [13] Carney B W. *PASP*, 1996, 108: 900 <http://dx.doi.org/10.1086/133811>
- [14] Thomas D, Greggio L, Bender R. *MNRAS*, 1999, 302: 537 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02138.x>
- [15] Carretta E, Cohen J G, Gratton R G, Behr B B. *AJ*, 2001, 122: 1469
- [16] Maraston C, Greggio L, Renzini A, et al. *A&A*, 2003, 400: 823
- [17] Worthey G, Faber S M, Gonzalez J J. *ApJ*, 1992, 398: 69 <http://dx.doi.org/10.1086/171836>
- [18] Tantalò R, Chiosi C, Bressan A. *A&A*, 1998, 333: 419
- [19] Pipino A, Puzia T H, Matteucci F. *ApJ*, 2007, 665: 295 <http://dx.doi.org/10.1086/519546>
- [20] Weiss A, Salaris M, Ferguson J W, Alexander D R. Preprint, 2006, astro-ph/0605666
- [21] 黄润乾. 恒星物理. 第 2 版, 北京: 中国科学技术出版社, 2012
- [22] 李焱. 恒星结构演化引论. 北京: 北京大学出版社, 2014
- [23] Kilkenny D, Herber U, Drilling J S. *SAAOC*, 1988, 12: 1
- [24] Stark M A, Wade R A. *AJ*, 2003, 126: 1455
- [25] Zhang X F, Chen X F, Han Z W. *A&A*, 2009, 504: L13
- [26] Caloi V, Antona F D. *A&A*, 2005, 435: 987
- [27] Johnson C I, Sneden C, Pilachowski C A, et al. *ASP Conf. Ser.*, 2005, 336: 331
- [28] Kilkenny D, Koen C, Jeffery J, et al. *MNRAS*, 1999, 310: 1119 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.03012.x>
- [29] Maxted P F L, Marsh T R, North R C. *MNRAS*, 2000, 317: L41 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03856.x>

- [30] Wang B, Meng X C, Chen X F, Han Z W. MNRAS, 2009, 395: 847
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14545.x>
- [31] Kilkeny D, Koen C, O'Donoghue D, Stobie R S. MNRAS, 1997, 285: 640 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/285.3.640>
- [32] Han Z W, Podsiadlowski P H, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2002, 336: 449
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05752.x>
- [33] Han Z W, Podsiadlowski P H, Lynas-Gray A E. MNRAS, 2007, 380: 1098
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12151.x>
- [34] Eggleton P P. MNRAS, 1971, 151: 351 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/151.3.351>
- [35] Eggleton P P. MNRAS, 1972, 156: 361 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/156.3.361>
- [36] Eggleton P P. MNRAS, 1973, 163: 279 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/163.3.279>
- [37] Han Z W, Podsiadlowski P H, Eggleton P P. MNRAS, 1994, 270: 121 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/270.1.121>
- [38] Pols O R, Tout C A, Eggleton P P, Han Z W. MNRAS, 1995, 274: 964 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/274.3.964>
- [39] Pols O R, Schröder K P, Hurley J R, et al. MNRAS, 1998, 298: 525
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01658.x>
- [40] Pols O R, Tout C A, Schröder K P, et al. MNRAS, 1997, 289: 869 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/289.4.869>
- [41] Schröder K P, Pols O R, Eggleton P P. MNRAS, 1997, 285: 696 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/285.4.696>
- [42] Iglesias C A, Rogers F J. ApJ, 1996, 464: 943 <http://dx.doi.org/10.1086/177381>
- [43] Eldridge J J, Tout C A. MNRAS, 2004, 348: 201 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07344.x>
- [44] Ferguson J W, Alexander D R, Allard F, et al. ApJ, 2005, 623: 585 <http://dx.doi.org/10.1086/428642>
- [45] Chen X F, Tout C A. ChJA&A, 2007, 7: 245
- [46] Guo J P, Zhang F H, Chen X F, Han Z W. ChJA&A, 2008, 8: 262
- [47] Grevesse N, Sauval A J. Space Sci. Rev., 1998, 85: 161 <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005161325181>
- [48] Salaris M, Weiss A. A&A, 1998, 335: 943
- [49] Alongi M, Bertelli G, Bressan A, et al. A&A Suppl. Ser., 1993, 97: 851
- [50] Stothers R B, Chin C W. ApJ, 1994, 421: L91 <http://dx.doi.org/10.1086/187195>
- [51] Vanden Berg D A, Swenson F J, Rogers F J, et al. ApJ, 2000, 532: 430 <http://dx.doi.org/10.1086/308544>
- [52] Napiwotzki R, Christlieb N, Drechsel H, et al. Astron. Nachr., 2001, 322: 411
[http://dx.doi.org/10.1002/1521-3994\(200112\)322:5/6<411::AID-ASNA411>3.0.CO;2-I](http://dx.doi.org/10.1002/1521-3994(200112)322:5/6<411::AID-ASNA411>3.0.CO;2-I)
- [53] Stroerer A, Heber U, Lisker T, et al. A&A, 2007, 462: 269
- [54] Rey S C, Yoon S J, Lee Y W, et al. AJ, 2001, 122: 3219
- [55] Moehler S, Landsman W B, Sweigart A V, Grundahl F. A&A, 2003, 405: 135
- [56] Dotter A, Sarajedini A, Yang S C. ApJ, 2008, 136: 1407
- [57] Kraft R P, Sneden C, Langer G E, Prosser C F. AJ, 1992, 104: 645
- [58] Sneden C, Kraft R P, Guhathakurta P, et al. AJ, 2004, 127: 2162
- [59] Harris W E. ApJ, 1996, 112: 1487
- [60] Cho D H, Lee S G, Jeon Y B, Sim K J. ApJ, 2005, 129: 1922
- [61] Paltrinieri B, Ferraro F R, Fusi P F, Carretta E. MNRAS, 1998, 293: 434
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01175.x>
- [62] Salaris M, Weiss A. A&A, 2002, 388: 492
- [63] Caty P, Alicia S, Sam B. National Optical Astronomy Obs. Proposal, 1999, 2: 111
- [64] Han Z W, Lei Z X. ASP Conf. Ser., 2014, 481: 213
- [65] Catelan M, Grundahl F, Sweigart A V, et al. ApJ, 2009, 695: L97 <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/695/1/L97>