

# 低质量 AGB 星核合成事件的相关性研究\*

刘永新

张 波

(机械工程学院静电研究所, 石家庄 050003) (河北师范大学物理系, 石家庄 050016)

彭秋和

(南京大学天文系, 南京 210093)

**摘要** 模型为低质量 AGB 星的热脉冲氢氮混合燃烧模型, 并考虑了恒星核心质量随脉冲的变化及星风质量损失的影响. 采用了一个从 $^{56}\text{Fe}$ - $^{210}\text{Bi}$  的无分支“s-过程”反应通道及从 $^{12}\text{C}$  到 $^{22}\text{Ne}$  的相关核素反应网络, 计算了 MS 星及 S 星碳氧比(C/O), 氟, 及“s-过程”重元素的超丰并同观测做了比较. 结果表明: 对于内禀 MS 星及 S 星, 氟的核合成与“s-过程”重元素的核合成, 是在 AGB 星氮燃烧壳层进行的两个不同的物理过程, 在热脉冲条件适宜时能够同时进行的; 核合成产物通过第 3 次挖掘到达表面, 从而使表面碳、氟以及重元素超丰. 由于氟的核合成是在一个较窄的温度范围内进行的, 因而对温度的变化较敏感. 还特别讨论了由此可能产生的观测效应.

**关键词** AGB 星 核合成 相关性

在核素合成的年鉴上, 对 S 星光谱 Tc 元素的发现, 应享有重要的地位. 这种不稳定核素的存在表明: AGB 星的内部肯定在进行 Tc 及其他核素的核合成. 现在我们已经知道 Tc 一类的重元素的合成是通过中子俘获完成的, 并将这种核合成过程称为“s-过程”. 从 Burbidge 等人<sup>[1]</sup>完成的有关核素合成的著名论文开始, 随着时间的推移, “s-过程”核素合成的特征也越来越清楚地被表述出来.

Hollowell 和 Iben<sup>[2]</sup>证明: 至少星族 II 低质量的热脉冲 AGB 星, 通过一个半对流混合过程产生的 $^{13}\text{C}$  会在热脉冲中通过反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  提供中子, 并对发生在此条件下的核合成事件做了分析. Kappeler 等人<sup>[3]</sup>则应用文献[2]的假说, 用低质量 AGB 星的热脉冲模型, 成功地解释了太阳系内主要“s-过程”核素的观测丰度. Wasserburg 等人<sup>[4]</sup>的研究结果表明, 太阳系的形成可能与 AGB 星有着密切的关系.

当然还有许多不确定的因素. 目前, 星族 I 恒星 $^{13}\text{C}$  产生的效率还不得不作为一个相对自由的参数来考虑, 有关“第 3 次挖掘”的参数也是如此, 许多研究者希望通过模型预测与观测的比较, 为解决这些问题打开缺口. 最近, Straniero 等人<sup>[5]</sup>计算了太阳金属度( $Z \sim 0.02$ )  $3M_{\odot}$  的热脉冲 AGB 星的演化, 首次自洽地计算出该金属度恒星的第 3 次挖掘. AGB 星表面氟的超丰的发现<sup>[6,7]</sup>, 为研究 AGB 星内部的核合成及第 3 次挖掘等方面的问题提供了一个新途径.

1995-11-08 收稿, 1996-02-05 收修改稿

\* 国家自然科学基金和国家“攀登计划”资助项目

氟是为数不多的起源尚未确定的核素之一,有许多研究者对它的起源问题做了探讨,提出了各种各样的模型. 在 1989 年的 MPI 年会上, Goriely 等人<sup>[8]</sup>对爆炸性氦燃烧环境下的氟的核合成进行了计算,他们的结果引起同行的重视. 后来 Forestini 将此模型推进一步,在<sup>13</sup>C 瞬时注入方式下,计算了 AGB 星热脉冲中氟的核合成<sup>[6]</sup>. 此后不久, Jorissen 等人便在红巨星上观测到氟的超丰,并第 1 次给出了太阳系外氟的丰度<sup>[7]</sup>. 分析表明,在他们观测的红巨星中,氟的丰度随着 C/O 值的提高而逐渐增长. 这些观测结果支持了 Forestini 关于氟在 AGB 星的热脉冲中核合成的假设. 然而, Forestini 的模型并不能很好地说明观测现象,他们难以解释富氟的 S 星及 N 型星表面氟的丰度<sup>[6]</sup>. 在此基础之上,我们对他们的模型做了修正,用<sup>13</sup>C 渐进注入方式下的低质量 AGB 星的热脉冲模型,计算 AGB 星的氟的核合成问题,得到的结果可以同观测相比较,证明氟在温度  $1.8 \leq T_8 < 2.8$  ( $T_8$  是以  $10^8 \text{K}$  为单位的温度)的范围内有效地核合成<sup>[9]</sup>.

由于模型的一致性,氟的核合成问题同“s-过程”核素的合成紧密地联系在一起:都是发生在 AGB 星热脉冲中的核合成过程. 而且观测也表明二者的丰度之间存在一定的相关性<sup>[7]</sup>. 然而, Jorissen 等人在运用 Forestini 的模型解释重元素的超丰与氟的超丰的相关性时,遇到难以克服的困难:<sup>13</sup>C 的瞬时注入机制难以提供足够的中子数密度,从而使“s-过程”不能有效地进行<sup>[7]</sup>. 因而得出了两个核合成事件不一定紧密相联的结论,但他们又从二者丰度相关的观测事实出发,从 AGB 星氟超丰的事实否定了<sup>22</sup>Ne 中子源在“s-过程”中的存在. 对恒星结构及演化的研究表明,在低质量 AGB 星中,<sup>13</sup>C 是主要中子源,<sup>13</sup>C 向氦燃烧壳层的注入是以渐进方式进行的<sup>[2]</sup>.

瞬时注入机制和渐进注入机制是两个不同的物理过程,瞬时注入是氢氦燃烧壳层一旦接触,氦壳层的<sup>13</sup>C 立即混合在氢燃烧壳层. 由于氦壳层的高度不稳定性(氦闪),氢壳层与氦壳层极快再分离,且<sup>13</sup>C( $\alpha, n$ )<sup>16</sup>O 在极短的时标内放出中子. 即实质上是假定在氢、氦壳层接触时,大量的中子立即释放出来,之后只有在氦燃烧壳层内,中子因“s-过程”而逐渐减少消失. 而渐进注入机制则是:氢、氦壳层接触后,“氦闪”使氢壳层向外逐渐移动,可以设想氢、氦壳层的物质混合需要一定的过程. 此外,即使<sup>13</sup>C 进入氦壳层后,开始时温度不太高,<sup>13</sup>C( $\alpha, n$ )<sup>16</sup>O 作为中子源是逐渐释放中子的. 这就使中子数密度在一定的时标里维持在一定的数值范围内.

迄今为止,有关 AGB 演化模型的计算中,对氢、氦燃烧壳层在热脉冲过程中如何相接触与再分离,以及物质的混合过程都不清楚. 从逻辑上看,中子源的渐进注入方式也是可能的. 由于前人利用瞬时注入机制未能得到很好的结果,我们尝试采用<sup>13</sup>C 渐进注入方式下低质量 AGB 星的热脉冲模型,在我们前一阶段工作<sup>[9]</sup>的基础上,进一步研究低质量 AGB 星 MS 及 S 星中氟的核合成与“s-过程”核素合成的相关问题,并对观测做出解释.

## 1 观测资料

根据 Lambert 的定义<sup>[10]</sup>,可以将富含“s-过程”核素的 MS 星及 S 星分为两类:

(1) 内禀 MS 星及 S 星:通常可以从这类恒星上观测到不稳定核素 Tc ( $\tau_{1/2} = 2 \times 10^5 \text{ a}$ ). 它的存在表明:恒星上正在进行第 3 次挖掘过程,把热脉冲中核合成的产物带到了表面.

(2) 外赋 MS 星及 S 星:这类恒星上没有 Tc 元素. 一般认为这类恒星属于双星系统,其光

学主星上富含“s-过程”核素的物质是通过质量交流来自一颗曾经历过热脉冲 AGB 的伴星,这颗伴星现在早已演化成白矮星. 这种质量转移过程至少发生在  $10^5$  a 以前,所以元素 Tc 都已衰变了.

本文集中分析内禀 MS 星和 S 星. 表 1 列出了我们选取的样品星. “s-过程”核素的丰度用  $[s/\text{Ti}]$  表示, 其中  $[s/\text{Ti}]$  是  $[\text{Y}/\text{Ti}]$ ,  $[\text{Zr}/\text{Ti}]$  及  $[\text{Nd}/\text{Ti}]$  的平均值. 氟的丰度用  $[\text{F}/\text{O}]$  表示:

$$[\text{F}/\text{O}] = \{[\log \epsilon(\text{F}) - 4.69] - [\log \epsilon(\text{O}) - \log \epsilon_{\odot}(\text{O})]\},$$

其中  $\log \epsilon(\text{H}) = 12.0$ .

表 1 红巨星样品星

| 内禀 MS 星和 S 星  |         |               |
|---------------|---------|---------------|
| BD + 48°1 187 | TVAUr   | S5/6          |
| HR1 556       | o'Orl   | M3IIIS        |
| HR3 639       | RSCnc   | M6IIaS        |
| HR4 647       |         | M4III         |
| HR6 072       | OPHer   | M5 + III      |
| HR8 062       |         | M4IIaS        |
| HD49 368      |         | S3/2          |
| HD64 332      | NQPup   | S4.5/2        |
| HD172 804     | V6790ph | S5/6          |
| HD199 799     |         | MS            |
| N 星           |         |               |
| BL Ori        |         | N0            |
| ST Cam        |         | N5; C6, 4     |
| TU Gem        |         | N3; C4, 6     |
| UU Aur        |         | N3; C5, 3     |
| VYU Ma        |         | N0; C6, 3; R8 |
| X Cnc         |         | N3; C5, 4     |
| Y Tau         |         | N2; C7, 4e    |
| Z Psc         |         | N0; C7, 3     |

## 2 模型

采用文献[11]中给出的 MS 星及 S 星的模型, 其初始金属度取 MS 星及 S 星的典型值  $Z_0 = 0.015$ , 初始质量  $M_i = 2M_{\odot}$ , 核心质量  $M_{\infty} = 0.55M_{\odot}$ , 质量损失规律遵循 Reimers 公式<sup>[12]</sup>:

$$\dot{M} = 4.65 \times 10^{-5} \eta \times 1.175 \times 0.315 \times (M_{\infty} - 0.5)^{1.68} \times Z_0^{0.088} / M_*^{(1+0.31s)} a^{0.52} \quad (1)$$

其中  $M_*$  是星体的质量,  $M_{\infty}$  是核心质量,  $Z_0$  是初始金属度, 参数  $S$  定义如下:

$$S = \begin{cases} 1, & M_i \geq 1.175 M_{\odot}, \\ 0, & M_i < 1.175 M_{\odot}. \end{cases} \quad (2)$$

$a$  是混合长度和压力标高的比值 ( $a = 1.5$ ), Reimers 参数  $\eta = 0.4$ .

假设所有的热脉冲都是相同的. 实际上, 一个给定的热脉冲, 通过对流所带走的质量 ( $M_{cs}$ ) 对模型的依赖性不大, 一旦其他的参数都固定了 (特别是核心质量), 不同的作者给出的数值基本相同,  $M_{cs} = 0.01 M_{\odot}$  [13].

热脉冲的参数取值, 采用  $^{13}\text{C}$  渐进注入方式下低质量 AGB 的热脉冲模型 [9]. 脉冲中的中子数密度在一定的时间范围内保持一个常数, 这一数值在  $10^8 \sim 10^9$  之间, 视具体的情况而定, 大约持续 12 a 左右. 作为标准状况, 计算中我们选取热脉冲物质密度为:  $\rho = 1\,500 \text{ g/cm}^3$ , 热脉冲温度  $T_8 = 2$ , 热脉冲温度变化范围为:  $1.5 \leq T_8 < 3.0$ , 热脉冲周期为  $10^5 \text{ a}$ .

除此这外, 一个热脉冲的重要参数, 就是热脉冲间的重叠因子  $r$ , 对于我们所考虑的星体, Iben 曾用插值法推导出一个  $r$  的解析式, 它是恒星核心质量 ( $M_{co}$ ) 的函数. 公式如下:

$$r = 0.45 - 0.795(M_{co} - 0.96) + 0.346(M_{co} - 0.96)^2. \quad (3)$$

对于初始质量  $M_i$  在  $1 \sim 2 M_{\odot}$  之间的星族 I 的 AGB 星而言, 核心质量  $M_{co}$  的理论估测值在  $0.55 \sim 0.77 M_{\odot}$  之间. 根据 (3) 式, 对应的  $r$  值应在  $0.6 \sim 0.8$  之间. 由于核心质量  $M_{co}$  随脉冲数近似作线性增长, 每个脉冲增加约  $0.005 \sim 0.01 M_{\odot}$  [10]. 根据文献 [11] 中的计算, 随着热脉冲发生次数的增加,  $r$  平滑地下降, 每个脉冲约减小  $0.005 \sim 0.01$ . 更精确的  $r(M_{co})$  的公式还有待于新的热脉冲模型的出现. 这里我们取

$$r_n = r_{n-1} - 0.01, \quad (4)$$

其中  $r_n$  是第  $n$  个热脉冲的重叠因子. 假定开始挖掘时  $M_{co} = 0.6 M_{\odot}$ , 取  $r_0 = 0.78$ .

为了更详细地探讨恒星内部的天体物理环境, 我们采用了一个从 Fe—Bi 的较大的反应网络, 以时间为变量, 采用数值计算的方法研究 AGB 星热脉冲阶段化学丰度的演化. 通过不断发生的挖掘过程, 碳、氟, 及“s-过程”核素从氦燃烧壳层来到表面. 星风引起的质量损失及 C—O 核心的质量变化, 采用文献 [11] 中的简化处理. 假设挖掘过程伴随每个热脉冲发生, 对表面丰度的混合效应可由下列方程来描述:

$$\frac{X_i}{X_{ie}} = (1 - d \cdot f) + d \cdot f \frac{X_{ip}}{X_{ie}}, \quad (5)$$

其中  $X_i$  表示某核素的观测丰度,  $X_{ip}$  表示进入包层的核反应物质中的该核素的丰度,  $X_{ie}$  则表示该核素在包层中的初始丰度, 稀释因子  $d \cdot f$  是每次指挖掘出来的物质质量与外包层质量的比值.

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 [F/O] 与 C/O 的相关性

根据文献中的恒星演化的计算 [13], 取每次热脉冲核反应物质中  $^{12}\text{C}$  的丰度为常数:  $X_p(^{12}\text{C}) = 1.42 \times 10^{-4}$ , 包层中一些轻元素的初始丰度, 选取 M 型星观测值的平均值, 其中  $X_e(^{12}\text{C}) = 1.39 \times 10^{-4}$ , 至于  $^{19}\text{F}$ , 则选取最近得到的 5 颗 K 型及 M 型恒星观测值 ( $[\text{F}/\text{H}] > 0.20$ ) 的平均值,  $\log \epsilon(^{19}\text{F}) = 4.69 \pm 0.09$ , 这个值比太阳系的值  $\log \epsilon(^{19}\text{F}) = 4.48 \pm 0.06$  略大

一些.

热脉冲计数从第 1 个有效热脉冲开始, 即当  $^{13}\text{C}$  中子源和第 3 次挖掘同时起作用时. 第一个有效热脉冲往往不是这颗 AGB 星上发生的第一个热脉冲.

图 1 给出了恒星表面  $^{19}\text{F}$  和  $^{12}\text{C}$  丰度的演化曲线. 其中实线是在单一温度下计算得到的 ( $T_8 = 2.0$ ), 虚线是在温度变化情况下计算得到的, 我们选取两个典型温度: 其中前两个脉冲温度取  $T_8 = 1.5$ , 从第三个脉冲开始, 取  $T_8 = 2.0$ . 在温度变化的情况下, 氟的丰度变化曲线与单一温度情形有所不同. 原因是: 如果最初几个 (本文取两个) 热脉冲中温度较低, 则这几个热脉冲中氟不能有效产生 (氟有效产生的温度范围是  $1.8 \leq T_8 < 2.8$ ), 这时只能挖掘出碳和“s-过程”元素. 随着脉冲次数的增加, 温度逐渐升高<sup>[2]</sup>, 达到  $T_8 = 2.0$  时, 氟也可有效产生. 这时, 氟、碳和“s-过程”元素同时被挖掘出来. 从模型计算得出的丰度演化曲线, 通过样品星在图上的对应点, 趋向 N 型碳星聚集的区域. 这种演化曲线的拟合表明: 内禀的 MS 星及 S 星表面  $^{19}\text{F}$  的丰度的变化, 是内部挖掘物质不断混入原始包层物质中的结果.

计算结果表明, 如果含氟和含碳比较丰富的氦燃烧壳层的反应物质能通过挖掘过程到达表面, MS 星及 S 星上观测到的  $[\text{F}/^{16}\text{O}]$  与  $(^{12}\text{C}/^{16}\text{O})$  的相关性就可以得到很好的解释; 另外, 样品星的氟的超丰, 可以通过模型计算得到. 关于这一点我们已在文献[9]中做了详细地讨论.

### 3.2 氟的核合成与重元素“s-过程”核合成的相关性

在同样的热脉冲条件下, 我们同时考虑并计算了重元素的核合成问题.

包层轻元素的初始丰度已经在上面的讨论中给出, “s-过程”核素的初始丰度则由太阳系的观测值乘以一个比例因子  $Z_0/Z_\odot$  得到, 其中  $Z_0 = 0.015$ , 是 MS 星及 S 星的平均金属度.

根据标准情形热脉冲中子辐照的计算, 每个热脉冲中可提供的中子辐射量  $\Delta\tau$  为:  $\Delta\tau = 0.075 \times 10^{-31} \text{m}^2$ . 恒星表面“s-过程”核素

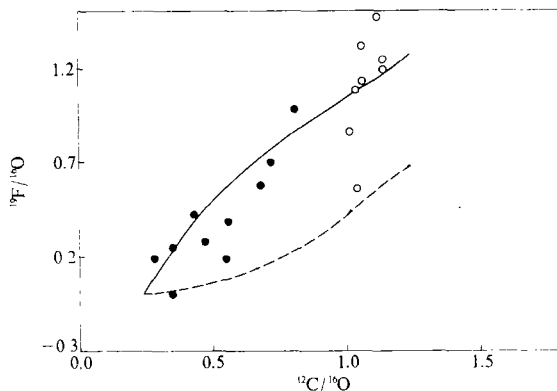


图 1 内禀 MS 和 S 星包层成分演化  
氟及碳的增长归因于内壳层物质的混入 (第 3 次挖掘).  
虚线对应于温度变化的一类演化线

丰度的变化, 主要由两方面因素决定: 一是来自氦壳层物质的混入, 另一个是星风引起的质量损失. 在模型允许的取值范围内调整各个参数, 得到的计算结果由图 2 给出.

计算结果显示出一个很普遍的趋势,  $[\text{F}/^{16}\text{O}]$  是随着  $(\text{s}/\text{Ti})$  的增长而增长, 二者之间近似地呈线性关系. 图中演化曲线通过绝大多数内禀 MS 星及 S 星所在区域到达 N 型碳星所在区域. 计算结果表明, 对绝大多数富氟的 MS 星及 S 星而言, 氟的核合成与“s-过程”核合成是同时进行的. 在同样的参数条件下计算表面碳、氟的演化也得到了

很好的拟合, 这从另一角度证实了这两类核合成事件的相关性. 图 1, 图 2 分别显示了两种不同模型 (恒温模型和变温模型) 下计算得到的  $[\text{F}/^{16}\text{O}]$  与  $(\text{s}/\text{Ti})$  的关系, 以及  $[\text{F}/^{16}\text{O}]$  与  $(^{12}\text{C}/^{16}\text{O})$  的关系.

从图中可见, 演化曲线可以将 MS 星和 S 星分为两类: 一类是富氟的 MS 星及 S 星, 一类是低氟含量的 MS 星及 S 星. 对第一类 MS, S 星, 挖掘开始时氦壳层温度已超过  $T_8 = 1.8$ , 这

时, 氟与重元素“s-过程”核合成可以同时进行; 因而可以通过对流同时将这些核素挖掘出来. 对后者而言, 它的丰度演化过程和前者是不同的. 通过计算拟合, 对这类恒星的丰度演化可以做出这样的解释:

在热脉冲的初始阶段, 由于热脉冲的温度太低,  $^{19}\text{F}$  难以形成, 因为氟仅能在一个狭窄的温度范围内核合成<sup>[6,9]</sup>. 然而, 热脉冲的温度却不至于低到影响重元素的核合成:  $^{13}\text{C}$  中子源在  $T_8 = 1.5$  时便能有效地发挥作用. 所以当热脉冲温度在  $1.5 \leq T_8 < 1.8$  这个范围内时, 恒星内部的“s-过程”就已开始, 重元素核合成后通过挖掘对表面的重元素丰度产生影响. 然而此时氟的核合成还未开始. 随着演化过程的进行, 热脉冲的温度逐渐升高, 达到氟合成的温度, 氟的核合成同重元素的“s-过程”核合成同时进行, 并对表面丰度同时产生影响. 为了使计算吻合这种情况, 在拟合时前后热脉冲选取了不同的温度, 其他参数保持不变. 这类演化曲线在图中以虚线表示. 可以看出, 计算曲线通过观测值所在区域.

总之, 内禀 MS 星及 S 星的观测丰度, 通过模型拟合得到很好的解释. 混合过程参数可使我们对星体内部的天体物理环境有所了解, 演化曲线与观测的拟合表明: 对绝大多数富氟的 MS 星及 S 星, 氟和重元素的核合成能够在 AGB 星的热脉冲中同时发生, 因而表面碳、氟及“s-过程”核素的丰度是同时增长的; 对于低氟的 MS 星及 S 星而言, 这两类事件不能同时发生的原因, 是由于初始热脉冲温度的影响. 事实上, 当热脉冲的温度处于氟核合成的温度范围内时, 这两个核合成事件可以同时发生.

## 4 结论

通过详细的丰度演化的计算, 我们研究了 AGB 星热脉冲中核合成事件的相关性问题. 我们将计算得到的  $[\text{F}/\text{O}]$  与  $(^{12}\text{C}/^{16}\text{O})$  的关系同红巨星的观测做了比较, 在自洽的基础上同时考虑了重元素的核合成, 结果表明  $[\text{F}/\text{O}]$  与  $(\text{s}/\text{Ti})$  有明显的相关性, 并与观测结果符合. 我们计算得到两类演化线, 对应于两个不同的核合成过程. 一类是核合成事件发生在一个适宜温度范围内, 氟与重元素的核合成同时发生, 热脉冲的温度变化可以忽略. 这个结果很好地解释了绝大多数富氟的 MS 星及 S 星的核素丰度的相关性; 另一类核合成事件开始发生时, 热脉冲温度处于一个比较敏感的区域, 不同的温度决定了不同的产物, 这对观测中低氟、碳及重元素丰度较高的恒星的核素演化做了初步地探讨.

随着理论研究的逐步深入及观测资料的逐渐增多, 人们对恒星的晚期演化以及恒星内部核合成的了解也会逐步深入. 由于综合考虑同一区域不同的核合成过程, 以上工作可能使我们能够更确切地了解恒星内部的物理条件及物理过程.

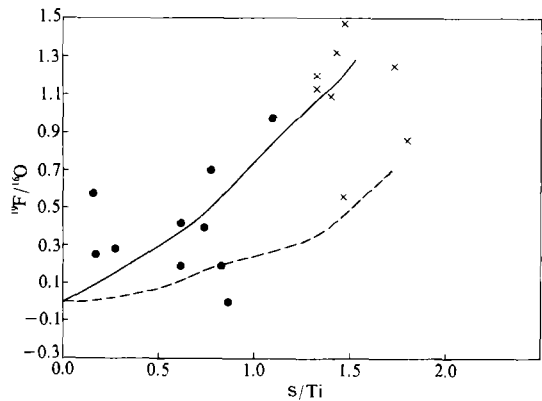


图 2 内禀 MS 和 S 星包层成分在氟-重元素丰度图中的演化

图内演示了两类演化线, 虚线对应于温度变化的一类演化线

## 参 考 文 献

- 1 Burbidge E M, Buridge G R, Fowler W A *et al.* Synthesis of the elements in stars. *Rev Mod Phys*, 1957, 29:547
- 2 Hollowell D E, Iben I Jr. Neutron production and neutron-capture nucleosynthesis in a low-mass low-metallicity asymptotic giant branch star. *Ap J*, 1989, 340:966
- 3 Kappeler F, Gallino R, Busso M *et al.* S-process nucleosynthesis: classical approach and asymptotic giant branch models for low-mass stars. *Ap J*, 1990, 354:630
- 4 Wasserburg G J, Busso M, Gallino R *et al.* Asymptotic giant branch stars as a source of short-lived radioactive nuclei in the solar nebula. *Ap J*, 1994, 424:412
- 5 Straniero O, Gallino R, Busso M *et al.* Radiative  $^{13}\text{C}$  burning in asymptotic giant branch stars and S-processing. *Ap J*, 1995, 440:L85
- 6 Forestini M, Gorielys S, Jorissen A *et al.* Fluorine production in thermal pulses on the asymptotic giant branch. *A & A*, 1992, 261:157
- 7 Jorissen A, Smith V V, Lambert D L. Fluorine in red giant stars: evidence for nucleosynthesis. *A & A*, 1992, 261:164
- 8 Goriely S, Jorissen A, Arnould M. On the mechanisms of  $^{19}\text{F}$  production. In: Hillebrandt W, Müller E eds. *Proc 5th workshop in nuclear Astrophysics; MPI/PI. Max Plank Institut für Astrophysik*. 1989, 60
- 9 刘永新, 张 波, 彭秋和. 小质量 AGB 星热脉冲阶段氟的核合成. *天体物理学报*, 1996, 16(1):57
- 10 Lambert D L. The chemical composition of AGB star and the S-process. In: Michard D, Tuakov A eds. *Evolution of stars; the Photospheric abundance connection* Dordrecht; Kluwer. 1991, 299
- 11 Busso M G, Gallino R, Lambert D L *et al.* Nucleosynthesis and mixing on the asymptotic giant branch I. Ms and S stars with and without Tc. *ApJ*, 1992, 399:216
- 12 Reimers D. Circum stellar envelopes and mass loss of red giant stars. In: Baschek B, Kegel H, Praving G eds. *Problems in stellar atmosphere and envelopes*. Berlin: Springer. 1975, 229
- 13 Boothroyd A I, Sackmann I J. Low-mass stars. III. Low-mass stars with steady mass loss: up to the asymptotic giant branch and through the final thermal pulses. *Ap J*, 1988, 328:653