

# 类太阳色球活动恒星的高色散光谱观测和 锂丰度\*

李远超<sup>1,2,3</sup> 邢丽峰<sup>1,2,3†</sup>

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院天体结构与演化重点实验室 昆明 650011)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 基于对9颗类太阳色球活动恒星高信噪比的高色散光谱观测, 测量了这些恒星锂线( $\lambda = 6707.8 \text{ \AA}$ )的等值宽度, 计算了这些恒星表层锂元素丰度. 通过研究这些类太阳色球活动恒星锂丰度和X射线光度之间的关系, 发现X射线光度强的类太阳色球活动恒星锂丰度值大于X射线较弱的恒星. 也就是说活动性较强的类太阳色球活动恒星其锂丰度较高, 活动性较弱的类太阳色球活动恒星其锂丰度较低. 考虑到主序的类太阳恒星锂元素和恒星自转速度随着恒星年龄的增加逐渐减少, 以及随着类太阳色球活动恒星自转速度的减小, 色球活动又逐渐变弱. 因此类似于锂丰度, 类太阳色球活动恒星自转速度的大小和恒星的活动水平也同样可以表明恒星的年龄.

**关键词** 恒星: 丰度, 恒星: 晚型, 恒星: 色球, X射线: 恒星

**中图分类号:** P144; **文献标识码:** A

## 1 引言

锂元素是在大爆炸初期形成的少数几种元素之一, 其在宇宙化学演化、元素核合成等方面的研究中都有着特别重要的地位. 对存在对流层的小质量恒星, 其外部壳层和内部的物质交换使得锂元素在恒星内部被损耗, 所以研究恒星的锂元素丰度对于理解恒星内部结构与演化具有十分重要意义.

对大量的类太阳(质量或光谱型与太阳相近)恒星的光谱、测光观测和研究发现, 自转较快的主序(包括零龄)类太阳恒星锂损耗较少<sup>[1-3]</sup>. 并且, 随着主序的类太阳恒星年龄增加恒星表层锂元素逐渐减少<sup>[4-5]</sup>. 所以锂又被称为类太阳恒星的年龄指示器<sup>[4-8]</sup>. 这也说明主序类太阳恒星中, 自转较快的恒星比自转较慢的恒星更为年轻. 模型计算预测和恒星转动周期(速度)观测研究都发现在星风的作用下, 类太阳恒星从零龄主序开始其自转逐渐变慢<sup>[9-14]</sup>. 所以, 恒星自转的快慢也可以大致表明主序恒星的年龄<sup>[15]</sup>. 对类太阳恒星高色散光谱和高精度测光研究还发现, 色球活动强的恒星, 也具有较高的锂丰

2021-01-06收到原稿, 2021-03-09收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U1831125、E1110101、U1331118)资助

†lfxing@ynao.ac.cn

度<sup>[16-21]</sup>. 那么色球活动恒星(色球活动强的恒星)的锂丰度和恒星活动强弱之间又有着什么样的关系呢?

大多数晚型(F-M型)矮星的大气层里面拥有黑子、光斑、谱斑、耀斑、星珥和星冕等类似太阳的活动现象, 所以这些晚型(F-M型)矮星又被称为类太阳活动恒星. 然而类太阳恒星的活动性强弱是与恒星自转速度相关的. 以色球活动和星冕辐射为例, 类太阳恒星色球活动水平(在活动性达到饱和之前)随恒星自转变快而快速增加. 自转较快的恒星(T Tauri型星、RS CVn和BY Dra等双星系统)的色球活动水平<sup>[22]</sup>、X射线辐射强度也较高<sup>[23-24]</sup>. 但是直至现在, 人们对类太阳活动恒星锂丰度和恒星活动之间关系的研究还没有得到比较清晰的结论. 我们以具有强的X射线辐射为依据, 从Tycho星表中选出了较亮(恒星V星等 $m_V \leq 10$  mag), 并且具有强的X射线辐射的类太阳恒星作为研究目标, 通过高色散光谱观测, 获得了这些恒星的高信噪比的高色散光谱, 测量了锂线的等值宽度, 计算了这些恒星表层锂元素丰度, 借此研究了这些恒星锂元素丰度和恒星活动之间的关系.

## 2 高色散光谱观测和数据处理

应用中国科学院云南天文台丽江天文观测站2.4 m望远镜及高色散光纤光谱仪(High Resolution Echelle Spectrograph, HiRES), 在2018年10月30日、11月14日以及2019年2月22日, 分别对9颗色球活动较强的恒星(包括4颗自转变星、3个双星或多星系统、一个RS CVn和一个BY Dra双星系统)进行了高色散光谱观测. 观测中我们选用了宽度0.5 mm的狭缝, 同时选用对应天空角为1.2"光纤导入星光, 对应光谱分辨率 $R = \lambda/\Delta\lambda = 48000$ . 光谱仪光谱波长覆盖范围为320–920 nm<sup>[25]</sup>. 每颗恒星都使用尽可能长的曝光时间以便获得高信噪比光谱. 在表1中我们给出了观测恒星一些参数和观测曝光时间等. 表1中SpT.表示恒星光谱型, B-V表示恒星色指数.  $T_{\text{eff}}$ 表示恒星有效温度, 单位为K. EW(Li)表示恒星锂线的等值宽度, 单位为mÅ.  $\lg N(\text{Li})$ 表示恒星锂丰度. Plx表示恒星的周年视差, 单位为mas. Exposure表示光谱观测所用曝光时间, 单位为s.  $\lg L_X$ 表示恒星X射线辐射流量的对数值,  $L_X$ 单位为W.  $\lg F_{\text{BR}}$ 表示恒星Ca II线绝对流量值的对数值,  $F_{\text{BR}}$ 单位为 $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

我们应用IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)软件包, 对2.4 m望远镜及其高色散光纤光谱仪观测获得的9颗恒星光谱图像进行了数据处理. 数据处理的方法和步骤主要包括: (1)图像预处理: 去除CCD (Charge Coupled Device)记录图像中的热点和死点; (2)级次定位: 应用平场或者恒星的光谱确定CCD所记录的光谱图像中每一级次的光谱位置; (3)减bias: 应用0 s曝光的bias去除CCD不同位置的偏差; (4)除平场: 利用平场对记录图像的CCD不同像素量子效率差异进行改正; (5)波长定标: 由光谱观测时拍摄的Th-Ar定标灯谱确定抽取的恒星光谱的波长, 给出恒星光谱沿波长方向的强度分布; (6)级次抽取: 沿着各个级次的方向将每个狭缝对应的像素值相加, 把二维光谱转换成一维的光谱. 经过数据处理得到了9颗样本恒星的高色散光谱, 我们将这些样本恒星光谱在锂I线 $\lambda 6707.8 \text{ \AA}$ 附近的部分画在了图1中.

表 1 样本恒星的测光数据及其他恒星参数  
Table 1 Photometric results and other parameters of our sample stars

| # | Star       | SpT.  | $m_V$<br>/mag | B-V<br>/mag | $T_{\text{eff}}$<br>/K | EW<br>(Li)<br>/mÅ | $\lg N$<br>(Li) | Plx<br>/mas | Exposure<br>/s | $\lg(L_X)$<br>/W | $\lg[F_{\text{BR}}/($<br>$\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$<br>$\cdot \text{s}^{-1})]$ |
|---|------------|-------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|-----------------|-------------|----------------|------------------|---|
| 1 | BD+30 397A | K8    | 10.12         | 1.205       | 4368                   | 217               | 2.23            | 23.66       | 3600+3600      | 29.95            | 5.621   |
| 2 | HD 21845   | K2    | 8.25          | 0.800       | 5068                   | 210               | 2.92            | 29.61       | 3600+3600      | 30.08            | 6.579   |
| 3 | BD+07 582  | K0    | 9.658         | 0.747       | 5502                   | 298               | 3.11            | 37.40       | 3600+3600      | 30.28            | 6.686   |
| 4 | HD 26923   | G8V   | 6.92          | 0.680       | 5640                   | 58                | 2.31            | 47.15       | 2400+2400      | 30.67            | 6.815   |
| 5 | HD 251108  | K2    | 9.89          | 1.332       | 4342                   | 115               | 1.68            | 1.8152      | 3600+3600      | 29.93            | 5.269   |
| 6 | BD+33 1646 | G2III | 6.368         | 0.774       | 5298                   | 22                | 1.98            | 7.55        | 3600           | 30.16            | 6.632   |
| 7 | HD 81025   | K4V   | 9.61          | 1.030       | 4709                   | 18.9              | 0.89            | 21.55       | 3600+3600      | 30.22            | 6.065   |
| 8 | BD+23 2581 | K7    | 9.9           | 1.400       | 4236                   | 14.8              | 0.40            | 48.26       | 3600+3600      | 29.40            | 5.071   |
| 9 | HD 220140  | G9V   | 7.54          | 0.893       | 5144                   | 198               | 2.29            | 50.07       | 3600+1800      | 30.02            | 6.381   |

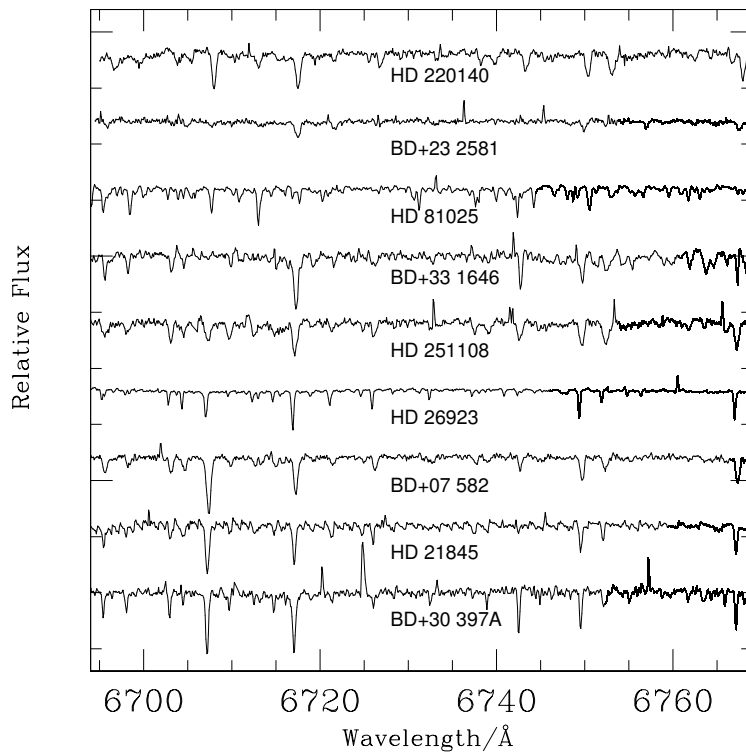


图 1 9颗观测样本恒星在锂I线 $\lambda$  6707.8 Å附近的光谱

Fig. 1 Examples of a portion of spectra of 9 stars in the range of the Li I  $\lambda$  6707.8 Å lines

首先确定所获恒星高色散光谱的连续谱, 然后将这些高色散光谱进行了归一化处理. 又由于观测光谱分辨率高( $10^5$ 量级), 可以较清楚地将锂I线 $\lambda$  6707.8 Å和

铁I线 $\lambda$  6707.44 Å区分开. 对锂吸收线(锂I线 $\lambda$  6707.8 Å)较弱的恒星光谱( $EW(\text{Li}) \leq 1.5 \times 10^{-2}$  Å), 我们直接应用高斯拟合方法获得了锂线等值宽度; 对锂吸收线(锂I线 $\lambda$  6707.8 Å)较强( $EW(\text{Li}) \geq 1 \times 10^{-1}$  Å)的恒星光谱, 应用直接积分方法获得了这些恒星锂吸收线等值宽度; 对锂吸收线为中等强度( $1.5 \times 10^{-2}$  Å  $\leq EW(\text{Li}) \leq 1 \times 10^{-1}$  Å)的恒星光谱, 则采用高斯拟合与直接积分两种结果的加权平均来获得锂吸收线的等值宽度. 在我们观测的9颗恒星中, 有5颗恒星曾经被其他研究人员<sup>[9, 26-27]</sup>观测和研究. 为了比较, 我们将通过高色散光谱观测获得的5颗恒星锂I线 $\lambda$  6707.8 Å线的等值宽度和其他研究人员获得的相同的5颗恒星锂线等值宽度比较图画在了图2中. 由图可见, 这5颗恒星锂吸收线等值宽度偏离均值小于 $3 \times 10^{-3}$  Å. 这表明, 应用中国科学院云南天文台丽江天文观测站2.4 m望远镜及其高色散光纤光谱仪观测所获得的高信噪比、高色散光谱以及恒星锂吸收线等值宽度是可信的.

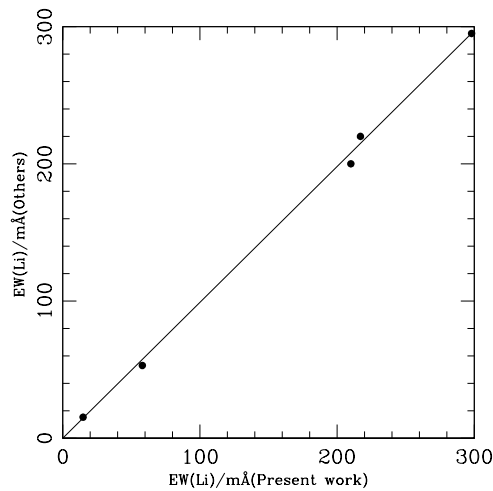


图2 我们获得的5颗样本恒星锂吸收线等值宽度与其他研究人员所得值的比较图<sup>[9, 26-27]</sup>

Fig. 2 Comparison of our measurements of the Li equivalent width and similar measurements obtained by other authors for 5 stars<sup>[9, 26-27]</sup>

### 3 锂丰度计算

#### 3.1 恒星有效温度和表面重力加速度

我们由VizieR数据库获得了9颗恒星的色指数(B-V), 又应用Casagrande等<sup>[28]</sup>的方法, 计算并得到了这9颗类太阳色球活动恒星的有效温度, 这9颗类太阳色球活动恒星的有效温度列在了表1中.

应用恒星重力加速度( $g$ )和恒星质量( $M$ )、半径( $R$ )关系:

$$g \propto \frac{M}{R^2}, \quad (1)$$

和恒星光度( $L$ )与恒星半径、有效温度( $T_{\text{eff}}$ )关系:

$$L \propto R^2 T_{\text{eff}}^4. \quad (2)$$

可以得到恒星的重力加速度:

$$\lg g = \lg g_{\odot} + \lg \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) + 4 \lg \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right) - \lg \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right), \quad (3)$$

其中 $g_{\odot}$ 、 $M_{\odot}$ 、 $T_{\text{eff},\odot}$ 和 $L_{\odot}$ 分别为太阳表面重力加速度、太阳质量、太阳的有效温度和太阳的光度. 这些类太阳色球活动恒星的光度可以通过下面的式子计算得到:

$$\left( \frac{L}{L_{\odot}} \right) = 0.0813d^2 \times 10^{-0.4m}, \quad (4)$$

这里的 $d$ 和 $m$ 分别为恒星的距离、恒星的视星等值. 恒星距离可以通过恒星的周年视差与恒星距离公式计算获得. 每颗类太阳色球活动恒星的周年视差是通过查询VizieR数据库得到. 为了获得恒星的质量, 我们将9颗恒星画在了赫罗图中, 通过各个恒星在赫罗图中的位置获得恒星的质量.

### 3.2 锂丰度计算

基于我们测得的9颗类太阳色球活动恒星锂线等值宽度, 应用Pavlenko和Magazzu<sup>[29]</sup>给出的基于非局部热动平衡(non-local thermodynamic equilibrium, NLTE)的生长曲线, 获得了这9颗恒星锂元素丰度(氢元素丰度 $\lg N(\text{H}) = 12.00$ ). Pavlenko和Magazzu<sup>[29]</sup>的生长曲线应用了基于局部热动平衡和平行平面层以及流体静力学平衡假设的Kurucz模型(ATLAS9)<sup>[30]</sup>. 而大气模型中涉及的主要参数有金属丰度、重力加速度和恒星有效温度, 其中金属丰度采用了太阳的金属丰度,  $\lg g$ 取值范围设为3.0–4.5,  $T_{\text{eff}}$ 取值范围设为3500–6000 K, 恒星微观湍流速度 $\xi$ 则设为定值 $2.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . 具体描述可参阅文献[9], 这9颗类太阳色球活动恒星的锂丰度见表1.

由于恒星锂丰度对温度敏感, 基于NLTE的生长曲线获得的锂丰度误差主要来源于恒星有效温度的差异. 其次还有恒星金属丰度取值与恒星实际金属丰度值差异、计算的重力加速度与恒星实际重力加速度差异, 还有恒星微观湍流速度取值与实际微观湍流速度值差异带来的误差. 不过这些恒星参数取值误差对锂丰度影响较小. 按照López-Valdivia等<sup>[31]</sup>的分析, 若在Kurucz模型中,  $T_{\text{eff}} = 5750 \text{ K}$ 、 $\lg g = 4.5$ 、金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ 和 $\xi = 2.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 等这些参数为定值, 如果恒星金属丰度改变 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.15 \text{ dex}$ 、重力加速变化 $\Delta \lg g = 0.5 \text{ dex}$ 、恒星微观湍流速度变化 $\Delta \xi = 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 会给锂丰度计算带来 $\Delta \lg N(\text{Li}) = 0.01 \text{ dex}$ 的误差. 9颗类太阳色球活动恒星的周年视差见表1. 由这9颗恒星的周年视差, 我们可以清楚看到这9颗恒星为近太阳恒星, 它们的金属丰度与太阳十分接近(例如: HD 21845、HD 26923、BD+33 1646和HD 220140其 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值分别为0.04、 $-0.047$ 、 $-0.02$ 和 $-0.03 \text{ Solar unit}$ ). 在Kurucz模型中金属丰度取定值 $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ , 与恒星实际金属丰度的差值给恒星锂丰度计算带来的误差很小; 依据López-Valdivia等<sup>[31]</sup>给出的F7–G2 MS型恒星 $\xi$ 值都在 $1.0$ – $2.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间. 在Kurucz模型中 $\xi$ 取为定值 $2.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与实际的恒星微观湍流速度的差值会给锂丰度

计算带来 $\Delta \lg N(\text{Li}) \leq 0.01$  dex的误差. 这与恒星有效温度变化 $\Delta T_{\text{eff}} = 100$  K给锂丰度计算带来误差 $\Delta \lg N(\text{Li}) = 0.09$  dex相比可以忽略. 其他研究人员<sup>[9, 26-27, 32]</sup>也曾获得了这9颗类太阳色球活动恒星中5颗恒星锂丰度, 我们把这5颗类太阳色球活动恒星锂丰度和其他研究人员获得的锂丰度比较图画在了图3中. 图中每一个点的横坐标代表我们获得的一颗恒星锂丰度值, 纵坐标代表其他研究人员获得的该恒星锂丰度值, 斜线代表锂丰度均值. 和预期相同, 我们获得的锂丰度与其他研究人员得到的值差异很小. 这也证明我们通过高色散光谱观测、计算获得的锂丰度是可靠的.

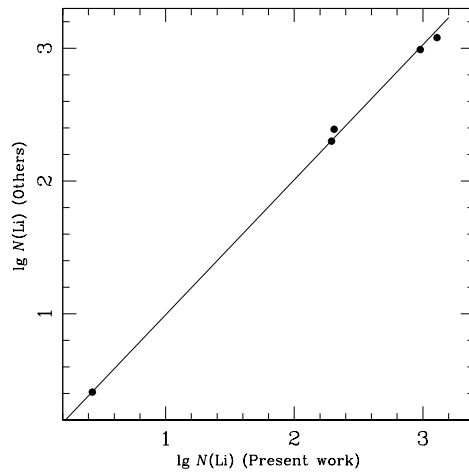


图3 本文的5颗类太阳色球活动恒星 $\lg N(\text{Li})$ 与其他研究人员<sup>[9, 26-27, 32]</sup>获得 $\lg N(\text{Li})$ 的比较图

Fig. 3 A comparison of  $\lg N(\text{Li})$  of 5 sample stars of this work with that of others<sup>[9, 26-27, 32]</sup>

### 3.3 X射线光度

我们从ROSAT (天文卫星: Röntgen Satellit)全天巡天亮源表中X射线源的数据, 获得了9颗类太阳色球活动恒星的X射线数据, 应用公式:

$$F_X = \text{ECF} \cdot \text{count rate} \text{ (erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}, \quad (5)$$

计算出了每颗恒星的X射线流量( $F_X$ ). 式中ECF为能量转换系数, 可由下面的式子给出:

$$\text{ECF} = (5.30\text{HR1} + 8.31) \times 10^{-12}, \quad (6)$$

其中 $\text{HR1} = (\text{Zh1} + \text{Zh2} - \text{Zs}) / (\text{Zh1} + \text{Zh2} + \text{Zs})$ , X射线观测通常用Zs、Zh1和Zh2表示ROSAT PSPC不同能量谱带软、硬1和硬2的相应计数, HR1为硬1计数. 再应用公式:

$$L_X = 4\pi d^2 F_X, \quad (7)$$

就得到了 $L_X$ . 我们在表1中给出了这9颗类太阳色球活动恒星的X射线光度.

## 4 讨论和结果

恒星活动性的强弱主要使用恒星光谱中的Ca II H和K、 $H_{\alpha}$ 等谱线辐射强度或者X射线光度来表征. 类太阳活动恒星大气层存在谱斑和星冕, 其中X射线辐射主要来自于星冕. 由于恒星的类太阳活动与恒星自转速度相关, 即类太阳恒星色球活动水平随恒星自转变快而快速增加. 对恒星锂耗散的研究发现, 自转较快的主序类太阳恒星比自转较慢的恒星锂损耗更少<sup>[1-3]</sup>. 为了探讨类太阳色球活动恒星的活动和锂丰度之间的关系, 我们通过高色散光谱观测, 由锂生长曲线得到9颗类太阳色球活动恒星的锂丰度, 并且将这些恒星的锂丰度和其X射线光度关系画在了图4中. 由图可见, 尽管存在一定的弥散, 但图4还是清楚表明: 样本恒星锂丰度值的大小随恒星的X射线光度增强而增大. 也就是说, 这些类太阳色球活动恒星锂丰度值随恒星活动变强而变大.

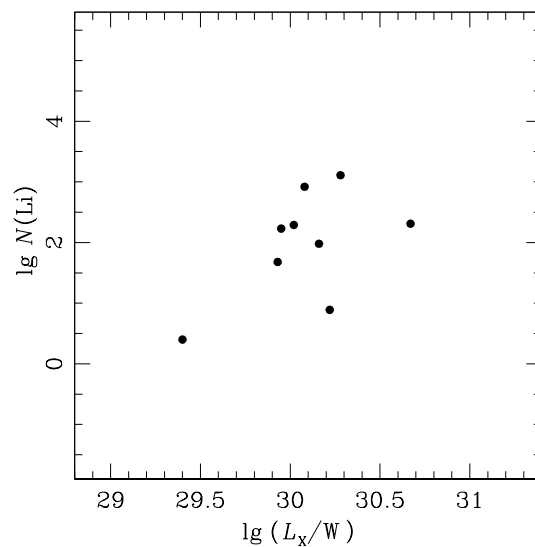


图4 类太阳色球活动恒星锂丰度和恒星X射线光度关系

Fig. 4 Lithium abundances as a function of the X-ray luminosity for the sample solar-type stars

为进一步证明这一结果, 我们还计算了9颗恒星Ca II线的绝对流量. Cincunegui等<sup>[33]</sup>通过研究晚型恒星活动性指标 $H_{\alpha}$ 、Ca II H和K线, 获得了Ca II线在连续谱上的平均流量( $f_{BR}$ ), 并将其转化为恒星Ca II线的绝对流量( $F_{BR}$ ), 也给出了Ca II线流量的经验公式. 我们应用Cincunegui等<sup>[33]</sup>给出的经验公式计算了这9颗类太阳色球活动恒星的Ca II线绝对流量( $F_{BR}$ ), 并将其列在了表1中. 并且将9颗类太阳色球活动恒星的Ca II线绝对流量( $F_{BR}$ )与恒星锂丰度关系图画在了图5中. 图中每个点的横坐标代表一颗恒星Ca II线绝对流量( $F_{BR}$ )值, 纵坐标代表该恒星锂丰度值. 和我们预期完全相同, 这些类太阳色球活动恒星的锂丰度值随恒星的Ca II线绝对流量( $F_{BR}$ )值变大而变大. 这又进一步说明, 这些类太阳色球活动恒星的锂丰度值随恒星活动变强而变大.

对于这些主序的类太阳色球活动恒星(色球活动较强的矮星)而言, 活动性较强的恒星其锂丰度也较高, 活动性较弱的恒星其锂丰度也较弱. 这些并不难理解, 主序的类太阳恒星锂元素随着恒星年龄的增加逐渐减少<sup>[4-5]</sup>. 另一方面, 类太阳恒星从零龄主序开始其

转动随着恒星年龄增加而逐渐变慢<sup>[9-14]</sup>. 随着类太阳色球活动恒星自转速度的减小, 色球活动变弱. 这也表明, 类似于锂丰度, 类太阳色球活动恒星自转速度的大小和恒星的活动水平同样也可以表明恒星的年龄. 这一结果支持恒星色球活动也是恒星年龄的指示器<sup>[34]</sup>.

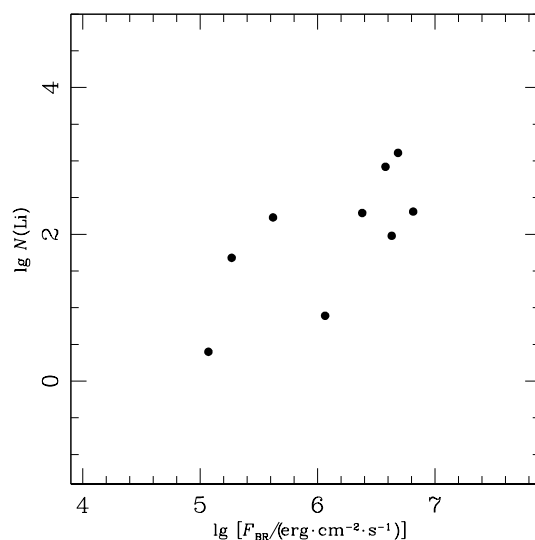


图 5 类太阳色球活动样本恒星锂丰度和恒星Ca II流量关系

Fig. 5 Lithium abundances as a function of the flux excess in the Ca II lines for the sample of solar-type stars

致谢 感谢审稿人对文章修改提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

### 参 考 文 献

- [1] Rebolo R, Beckman J E. *A&A*, 1988, 201: 267
- [2] Chaboyer B. *IAUS, New Eyes to See Inside the Sun and Stars*. Kyoto: Kluwer Academic Publishers, 1998, 185: 25
- [3] Tschäpe R, Rüdiger G. *A&A*, 2001, 377: 84
- [4] Herbig G H. *MNRAS*, 1965, 273: 559
- [5] Bodenheimer P. *ApJ*, 1965, 142: 451
- [6] Duncan D K. *ApJ*, 1981, 248: 651
- [7] Soderblom D R. *ApJS*, 1983, 53: 1
- [8] Xing L F, Xing Q F. *A&A*, 2012, 537: A91
- [9] Xing L F. *ApJ*, 2010, 723: 1542
- [10] Bouvier J. *ASPC*, 1994, 64: 151
- [11] Soderblom D R, Stauffer J R, MacGregor K B, et al. *ApJ*, 1993, 409: 624
- [12] Collier Cameron A, Campbell C G, Quaintrell H. *A&A*, 1995, 298: 133
- [13] Keppens R, MacGregor K B, Charbonneau P. *A&A*, 1995, 294: 469
- [14] Finley A J, Matt S P. *ApJ*, 2018, 854: 78
- [15] Takeda G, Ford E B, Sills A, et al. *ApJS*, 2007, 168: 297
- [16] Pasquini L, Liu Q, Pallavicini R. *A&A*, 1994, 287: 191
- [17] Favata F, Barbera M, Micela G, et al. *A&A*, 1993, 277: 428



- [18] Favata F, Barbera M, Micela G, et al. *A&A*, 1995, 295: 147
- [19] Tagliaferri G, Cutispoto G, Pallavicini R, et al. *A&A*, 1994, 285: 272
- [20] Tagliaferri G, Pastori L, Cutispoto G, et al. //da Silva L, de Medeiros R, Spite M. *The Light Elements and Their Evolution*. IAUS, 2000, 198: 366
- [21] Jeffries R D. *MNRAS*, 1995, 273: 559
- [22] Fang X S, Zhao G, Zhao J K. *MNRAS*, 2018, 476: 908
- [23] Soderblom D R, Duncan D K, Johnson D R H. *ApJ*, 1991, 375: 722
- [24] Pizzolato N, Maggio A, Sciortino S. *A&A*, 2000, 361: 614
- [25] Wang C J, Bai J M, Fan Y F, et al. *RAA*, 2019, 19: 149
- [26] Zickgraf F J, Krautter J, Reffert S, et al. *A&A*, 2005, 433: 151
- [27] da Silva L, Torres C A O, de la Reza R, et al. *A&A*, 2009, 508: 833
- [28] Casagrande L, Portinari L, Flynn C. *MNRAS*, 2006, 373: 13
- [29] Pavlenko Y V, Magazzu A. *A&A*, 1996, 311: 961
- [30] Castelli F, Gratton R G, Kurucz R L. *A&A*, 1997, 318: 841
- [31] López-Valdivia R, Hernández-Águila J B, Bertone E, et al. *MNRAS*, 2015, 451: 4368
- [32] Mishenina T V, Soubiran C, Bienaymé O, et al. *A&A*, 2008, 489: 923
- [33] Cincunegui C, Díaz R F, Mauas P J D. *A&A*, 2007, 469: 309
- [34] Pace G. *A&A*, 2013, 551: L8

## High-dispersion Spectroscopic Observations and Lithium Abundance of the Chromospherically Active Solar-type Stars

LI Yuan-chao<sup>1,2,3</sup> XING Li-feng<sup>1,2,3</sup>

(1 *Yunnan Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)  
(2 *Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)  
(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**ABSTRACT** Based on the high signal-to-noise ratio (S/N) and high-dispersion spectroscopic observations, we derived the equivalent width of the Li I  $\lambda$  6707.8 Å and the lithium abundance for 9 active late-type stars. The correlation between the lithium abundance and the X-ray luminosity ( $\lg L_X$ ) indicates that the lithium abundance of these 9 active late-type stars with a higher X-ray luminosity tends to be larger than that of those with lower X-ray luminosity. That is to say that the lithium abundances analogs progressively increase as the activity increases for these late-type stars. Considering both the lithium abundance and the rotational velocity decreases with increasing stellar age for main-sequence stars and activity increasing with increasing rotation velocity for active late-type stars, like lithium abundance, the rotational velocity and stellar activity are also considered good indicators of age for late-type stars.

**Key words** stars: abundances, stars: late-type, stars: chromospheres, X-rays: stars