

银河系 Fe 丰度梯度分析*

崔辰州 赵刚 赵永恒 施建荣

(中国科学院北京天文台,北京 100012)

摘要 利用依巴谷星表提供的高精度自行、三角视差,在 Allen 和 Santillan 1991 年提出的银河系质量分布模型的基础上,得出了 1 302 颗恒星在银河系势场中的运行轨道,并对其中的 1 295 个样本进行了丰度分析。通过把这些恒星的 Fe 丰度与其轨道参数做相关分析,得出在银心距 $8.5 \text{ kpc} < DG_{\max} < 17 \text{ kpc}$ 的范围内,Fe 丰度梯度为 $(-0.057 \pm 0.007) \text{ dex/kpc}$,且沿银盘法向梯度明显大于沿径向的梯度。在此基础上,对其中的巨星,矮星 F, G, K 型星又分别进行了统计分析,并把样本分为盘星、晕星两类对其丰度进行比较,结果表明:Fe 元素丰度梯度从巨星到矮星、从 F 型星到 K 型星有逐渐减缓的趋势;盘星丰度明显高于晕星丰度。研究进一步证实银河系铁丰度梯度确实存在,支持了在银河系早期晕族恒星先于盘族恒星形成、厚盘恒星先于薄盘恒星形成的化学演化模型。

关键词 恒星 丰度-银河系 演化

银河系化学元素丰度梯度对银河系演化研究具有非常重要的意义。利用观测数据进行元素丰度的统计分析已成为许多天文学家的研究课题。迄今,在此领域已有大量文章发表。从大多数的统计结果看,元素丰度梯度是确实存在的。但梯度的大小及其空域、时域变化还有较大的不确定性。

从目前的工作来看,人们利用的天体主要有以下 5 种类型:H II 区^[1],行星状星云^[2~5],早型星特别是 B 型星^[6~11],超新星遗迹^[12]以及球状星团^[13]。研究者们之所以选用这几种天体做元素丰度梯度分析,是因为它们的化学组成在一定程度上反映了当前(对于 H II 区及早型星)或其前身天体(对于行星状星云和球状星团)所处星际介质的化学组成。星际介质中的元素特征则为星系核合成带来的超丰过程提供了原始记录。

通过数十年的研究,人们得出的初步结果主要有以下几点:

(i) 元素丰度梯度的存在被逐渐认同。

在对 H II 区和行星状星云的研究中,人们得到了比较好的线性相关结果,而 B 型星的研究结果则显示出很小的梯度,甚至可以说不存在梯度^[9]。由于所用样本数据与分析方法的不同,不同研究者得出的结果不同,梯度从 $0 \sim -0.1 \text{ dex/kpc}$ 不等^[8]。

(ii) 不同元素其丰度梯度大小有所不同^[1,2]。

2000-01-03 收稿, 2000-05-28 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:19725312)和国家重点基础研究专项基金资助项目

某些元素其丰度梯度之间有一定的相关性而另一些则没有发现^[3].

(iii) 不同类型天体其元素丰度梯度大小不同.

对行星状星云的研究表明 I, II, III 不同类型的行星状星云丰度梯度有稍许不同. 据此, 丰度梯度有随银河系演化而逐渐变陡的趋势. I 及 II 型 PN 有与 HII 区相近的丰度梯度^[5].

与其他研究者相比, 我们的做法有以下几个特点:

(i) 统计目标以主序星为主. 主序星由内核氢燃烧提供辐射能量, 氢燃烧过程对恒星大气中元素的化学成分几乎没有影响. 观测得到的 [Fe/H] 能很好代表该恒星形成时所在处的星际介质环境的 [Fe/H].

(ii) 利用恒星轨道参数进行统计分析. 若假设在银河系演化过程中其势场没有发生重大变化, 则恒星轨道的动力学特征将是银河系形成与演化过程的良好体现. 利用银河系质量分布模型拟合出恒星在银河系中的运行轨道, 把计算得出的最大银心距 (DG_{\max})、最大银盘径向距 (R_{\max})、最大银盘法向距 (Z_{\max}) 及运行轨道的离心率 (e) 作为恒星的动力学参数, 这更有利真实反映银河系演化的过程. 以前的研究工作主要是针对 R_{\max} 方向展开的. 本文对多轨道参数同时分析将有助于对丰度梯度的全面了解.

(iii) 样本数量大. 大多数研究者利用的样本数量都在 300 个以下, 我们的恒星样本数量则达 1 302. 数量的增加使样本的统计性结果更为可靠, 同时也提高了分析结果的显著性.

1 数据的选取

为了进行轨道数值积分和元素丰度统计, 对每颗恒星我们必须知道其 [Fe/H]、赤经、赤纬、自行、三角视差和视向速度. 很少有单一的星表能提供所有这些数据. 为此, 我们只好利用多个星表, 综合利用其结果来完成统计工作. 本文中数据来源主要从下面 3 个方面考虑:

(i) [Fe/H] 数据. 本文中的 [Fe/H] 数据有两个来源. 大部分是从 Marsakov 与 Shevelev 完成的太阳附近 F 型星的年龄、丰度、轨道参数及其他参数星表^[14] 中提取的. 在这个星表中, 他们计算得出了太阳附近 80 pc 范围内 5 489 颗 F 型星的绝对星等、金属丰度、有效温度等许多基本参数. 其余 [Fe/H] 数据则来源于 Cayrel 等人第 5 次修订的 [Fe/H] 表^[15]. 该表提供了 3 247 颗星的 5 946 条 [Fe/H] 数据, 其中包括 2 497 颗场星的 4 716 条 [Fe/H] 数据.

(ii) 视向速度. 本文采用的恒星视向速度来自几个方面. 大部分出自 Hoffleit 和 Warren 第 5 版的亮星星表 (BSC5)^[1]. 该亮星星表及其以前版本作为亮于 6.5 等恒星的基本数据源已被天文界广泛使用. 部分视向速度来自于 Barbier-Brossat 等人编纂的视向速度星表^[16]. 该表收集了 1970 ~ 1985 年间得到的 24 200 颗恒星的视向速度. 其余部分则来自于 Andersen 和 Nordström 观测得到的两个南天亮星视向速度表^[17, 18]. 他们利用欧洲南方天文台 (ESO) 1.5 m 望远镜的观测数据分别得到 146 颗星族 II F 型星及 551 颗 A0 到 F4 型 HR 和 FK 星的视向速度.

(iii) 其他动力学参数. 为了拟合出一颗恒星在银河系势场中的轨道, 除了视向速度还需知道其自行 (PM) 和三角视差. 这些数据我们取自欧洲空间局 (ESA) 1997 年发表的依巴谷星表^[19]. 依巴谷卫星是 ESA 1989 年 8 月发射的一颗高精度天体测量卫星. 经过 3 年多的观测,

¹⁾ Hoffleit E D, Warren Jr W H. The Bright Star Catalogue. 5th Revised ed. ADC, 1991, v/50

它以空前的精度获得了 118 218 颗天体的位置、自行、三角视差及其他数据, 为天文学家提供了一大批精确的恒星基本数据.

在直接利用之前, 必须对这些数据进行筛选. 首先从 Fe 丰度表中取出 [Fe/H] 数据. 对于存在多次测量结果的星, 取最新发表的结果. 然后从依巴谷星表中提取出这些天体对应的赤经、赤纬、自行和三角视差. 最后, 在视向速度星表中提取其相应的视向速度, 经过这种交叉筛选, 最后用于轨道计算的样本总共是 1 302 颗.

2 恒星轨道计算

在 Allen 与 Martos 1986 年提出的银河系质量分布模型(简称 AM1986)^[20]的基础上, Allen 和 Santillán 1991 年提出了一个改进模型(简称 AS1991)^[21]. AM1986 模型提出后已被许多研究者所采用. AS1991 模型核球部分用一个中心分布质量代替了 AM1986 模型中的中心质量点, 对包括银盘势函数在内的其他方面做了改进, 合理性进一步增强. 依据该模型, 银河系由核球、银盘和银晕三部分构成. 模型中的银河系总质量为 $9 \times 10^{11} M_{\odot}$. 从数学角度来看, 该模型完全解析、处处连续和可导, 非常简单. 它能很好的吻合观测得出的银河系旋转曲线和太阳本地纵向力 F_z .

在已知恒星初始位置和速度参数(X, Y, Z, U, V, W)(其中 X, Y, Z 为恒星在银心直角坐标系中的位置坐标, U, V, W 是相应三方向的速度分量)的情况下, 利用 Press 给出的自适应步长控制 Runge-Kutta-Fehlberg^[22] 进行数值积分, 便可拟合出恒星在银河系势场中的轨道.

有了恒星的位置坐标 X, Y, Z 便可很方便的得出它的银心距 DG , 银盘径向距 R , 如公式所示:

$$\begin{aligned} DG &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \\ R &= \sqrt{X^2 + Y^2}, \\ Z &= Z. \end{aligned}$$

由于依巴谷星表中给出的恒星的动力学参数不是直接的 X, Y, Z, U, V, W , 而是赤道坐标(赤经 RA, 赤纬 DE)、自行(赤经自行 PMRA, 赤纬自行 PMDE)、三角视差, 所以在进行数值积分之前先要从恒星的动力学参数计算出其初始位置参数. 利用 Johnson 和 Soderblom^[23] 给出的方法便可以得到恒星的(X, Y, Z, U, V, W).

需要说明的一点是 AS1991 模型是一个均匀的、静态的银河系模型. 银河系的实际情况要复杂得多. 计算得出的轨道与实际轨道之间可能存在一定差距.

我们对 1 302 颗星进行了轨道计算. 得到的轨道中, 最大银心距为 17.04 kpc, 最大银盘径向距 3.86 kpc. 由于 AS1991 模型当银心距 $DG < 1$ kpc 时存在不足, 使轨道积分结果可信度大为降低, 在以下的统计分析中, 最小银心距 $DG_{\min} < 1$ kpc 的部分没有包括在内.

3 数据统计结果

数据处理过程中, 我们对 1 302 颗星进行了轨道计算. 考虑到 AS1991 模型在银心距 $DG < 1$ kpc 时带来的轨道积分误差较大, 可能影响获得正确的统计分析结果, 因此, 我们删去了 $DG_{\min} < 1$ kpc 的 7 颗统计样本, 最后被采用进行分析的样本数为 1 295 颗. 这些样本的最大银

心距范围为 $8.5 \text{ kpc} \leq DG_{\max} \leq 17.04 \text{ kpc}$, 最大银盘法向距范围为 $0 \text{ kpc} \leq Z_{\max} \leq 3.86 \text{ kpc}$.

图 1 中(a)~(d)分别是 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 作为 DG_{\max} , R_{\max} , Z_{\max} 及轨道离心率 e 的函数,以散点图形式给出的结果. 图中的拟合直线是利用关系式: $[\text{Fe}/\text{H}] = A + B \times X$, 对 Fe 丰度与轨道动力学参数进行线性拟合的结果, 其中 X 为相应的动力学参数, B 为梯度, A 为拟合常数. 表 1 是拟合直线的系数及统计结果. 对绝大多数样本 Z_{\max} 相对 R_{\max} 很小, DG_{\max} 主要取决于 R_{\max} , 所以图 1(a)与(b)的结果很相似. 从样本图与参数表可以看出, $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与这 4 个轨道参数都有一定程度的相关性, 但 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与 DG_{\max} 和 R_{\max} 的相关性比与 Z_{\max} 的相关性稍弱. $[\text{Fe}/\text{H}]$ 丰度梯度对 DG_{\max} 参量梯度改变为 $(-0.057 \pm 0.007) \text{ dex/kpc}$, 对 Z_{\max} 是 $(-0.411 \pm 0.023) \text{ dex/kpc}$. 同时, 我们注意到 Fe 丰度梯度沿银盘法向比沿银盘径向要陡.

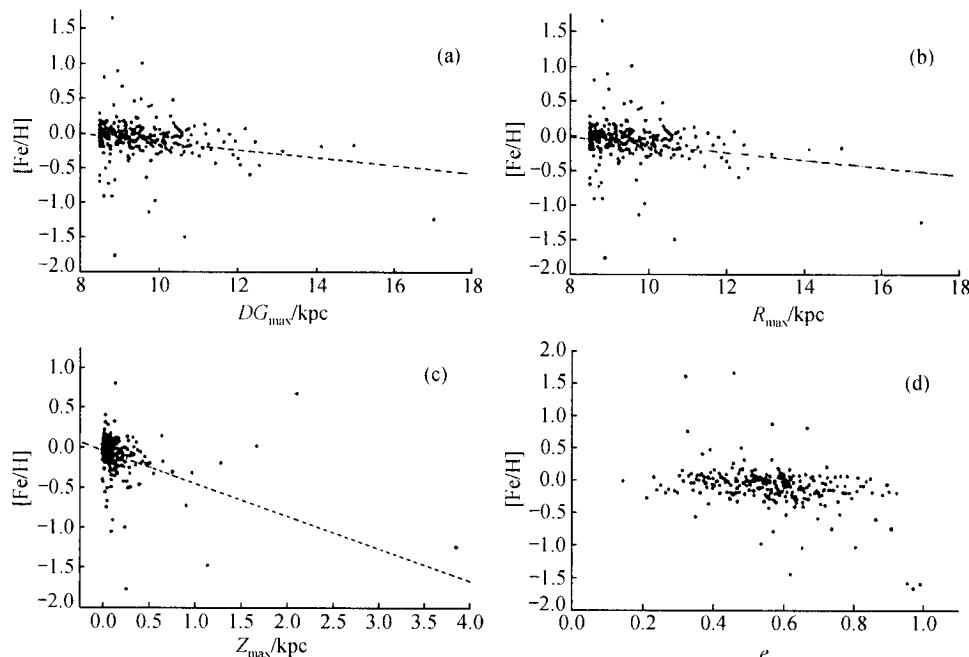


图 1 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与不同轨道参数的关系

(a) 银心距 DG_{\max} , (b) 银盘径向距 R_{\max} , (c) 最大银盘距 Z_{\max} , (d) 轨道离心率 e

表 1 丰度梯度统计参数表^{a)}

参数	A	B	R	SD	N
DG_{\max}	0.447(0.066)	-0.057(0.007)	-0.229	0.264	1 295
R_{\max}	0.440(0.066)	-0.057(0.007)	-0.226	0.264	1 295
Z_{\max}	-0.037(0.008)	-0.411(0.023)	-0.451	0.242	1 295

a) A, B 为拟合直线系数; R 为相关系数; SD 为剩余标准差; N 为原图数据点

$[\text{Fe}/\text{H}]$ 之所以与离心率 e 有相关性, 这很大程度上是因为 e 与 DG_{\max} 密切相关:

$$e = \frac{\sqrt{DG_{\max}^2 - DG_{\min}^2}}{DG_{\max}}$$

由于 e 与 DG_{\max} 不是线性关系, [Fe/H] 与 e 自然也不是简单的线性关系。这里, 我们没有进一步对它进行数值相关分析。

为了更进一步了解不同光度型、光谱型样本的 Fe 丰度梯度, 我们对数据进行了细分, 选出巨星 320 颗, 矮星 757 颗, F, G, K 型星分别为 813, 228 和 152 颗, 相应的统计结果列在表 2 中。

表 2 丰度梯度分组统计结果^{a)}

	参数	A	B	R	SD	N
巨 星	DG_{\max}	0.801(0.166)	-0.092(0.017)	-0.285	0.289	320
	R_{\max}	0.781(0.167)	-0.090(0.017)	-0.278	0.290	320
	Z_{\max}	-0.023(0.017)	-0.333(0.044)	-0.390	0.278	320
矮 星	DG_{\max}	0.367(0.084)	-0.052(0.009)	-0.211	0.278	757
	R_{\max}	0.363(0.084)	-0.051(0.009)	-0.210	0.278	757
	Z_{\max}	-0.048(0.010)	-0.459(0.029)	-0.498	0.246	757
F 型 星	DG_{\max}	0.411(0.064)	-0.053(0.007)	-0.268	0.208	813
	R_{\max}	0.410(0.064)	-0.052(0.007)	-0.267	0.208	813
	Z_{\max}	-0.034(0.008)	-0.408(0.029)	-0.449	0.193	813
G 型 星	DG_{\max}	0.414(0.197)	-0.059(0.020)	-0.191	0.324	228
	R_{\max}	0.381(0.198)	-0.056(0.020)	-0.180	0.325	228
	Z_{\max}	-0.047(0.019)	-0.437(0.035)	-0.640	0.254	228
K 型 星	DG_{\max}	0.248(0.107)	-0.039(0.011)	-0.275	0.152	152
	R_{\max}	0.248(0.107)	-0.039(0.011)	-0.274	0.152	152
	Z_{\max}	-0.091(0.016)	-0.186(0.061)	-0.243	0.153	152

a) 各项参数含义同表 1

从分类统计看, 巨星丰度与 DG 参量的相关性与矮星丰度对 DG 参量的相关性相当, 梯度陡度比矮星大。在 DG 参量上巨星梯度为 (-0.092 ± 0.017) dex/kpc, 矮星为 (-0.052 ± 0.009) dex/kpc。 Z_{\max} 方向, 矮星比巨星梯度大, 相关性好。前者梯度为 (-0.459 ± 0.029) dex/kpc, 后者为 (-0.333 ± 0.044) dex/kpc。

若把 G 型星丰度梯度的较大离散考虑在内, 从表 2 可发现: 从 F 型星到 K 型星, 在 DG 方向的 Fe 丰度梯度陡度逐渐变缓, 依次为 (-0.053 ± 0.007) , (-0.059 ± 0.020) , (-0.039 ± 0.011) dex/kpc。这种趋势在 Z_{\max} 参量上没有表现出来, 梯度分别为 (-0.408 ± 0.029) , (-0.437 ± 0.035) , (-0.186 ± 0.061) dex/kpc。

若按银盘厚度为银道面上下各 1 kpc 把所用样本划分为盘族星和晕族星, 结果得到盘族星 1 272 颗, 晕族星 23 颗, 两类星的丰度分布如图 2 所示。可以看出盘族恒星的 Fe 丰度要明显大于晕族恒星。

在所有的统计样本中, $[Fe/H] < -1$ 的有 21 颗, 其中有 9 颗 $Z_{\max} > 1$ kpc, 而 $Z_{\max} > 1$ kpc 的样本 23 颗。也就是说晕族星中相当一部分是极贫金属星, 另一方面极贫金属星大部分是晕

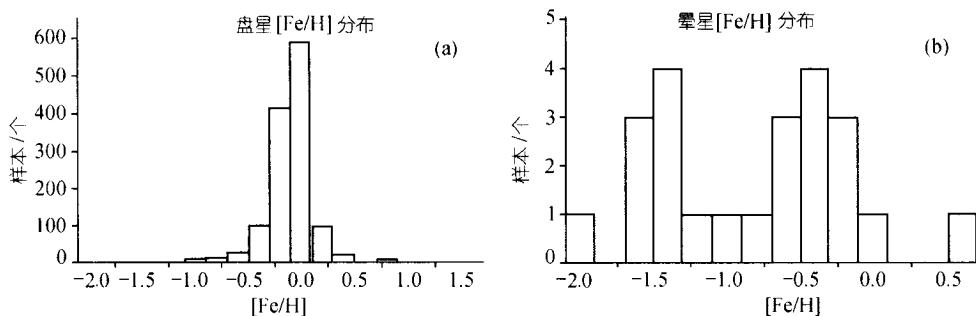


图2 盘族及晕族恒星[Fe/H]分布图

(a) 盘族星, (b) 晕族星

族星。晕族星与极贫金属星的密切关系正是银河系演化理论的重要证据。由于样本中绝大多数(仅23个除外)是盘星,所以少量晕族星数据的加入是统计结果离散性的重要来源。将 $Z_{\max} > 1 \text{ kpc}$ 除去后得到的盘族星[Fe/H]与 R_{\max} 及 Z_{\max} 的关系如图3所示。[Fe/H]对 R_{\max} 线性拟合的标准差为0.236,可见离散明显减小。

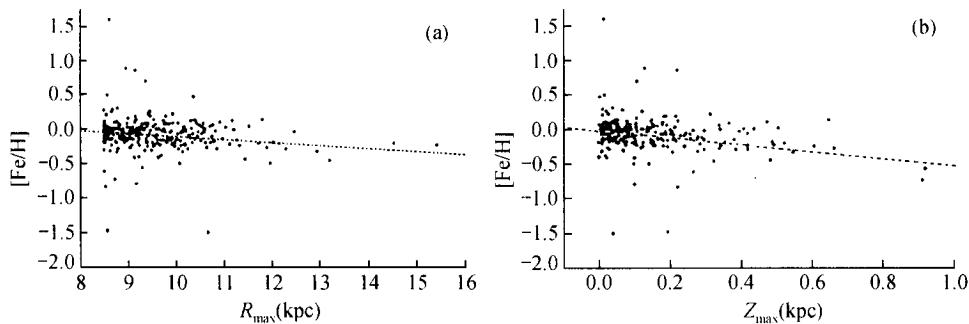


图3 盘族星的Fe丰度梯度

(a) 在银盘径向,(b) 垂直于银盘方向

另一方面,在[Fe/H]最大的10个样本中B型星占了7个。而B型星正是小年龄星的代表,它的丰度在一定程度上可看成是所在处当前银河系中星际介质的丰度。这也证明金属丰度随银河系演化而逐渐提高。

4 结论

在计算得出的1 302颗星运动轨道的基础上,经过去除 $DG_{\min} < 1 \text{ kpc}$ 的样本,我们最终对1 295颗星的[Fe/H]与其轨道参量进行了统计分析。我们的工作进一步证实银河系丰度梯度的存在,得出在 $8.5 \text{ kpc} \leq DG_{\max} \leq 17 \text{ kpc}$ 的范围内[Fe/H]与最大银心距、最大银盘径向距、最大银盘法向距的梯度关系如下:

$$[Fe/H] = -(0.057 \pm 0.007)DG_{\max} + (0.447 \pm 0.066),$$

$$[Fe/H] = -(0.057 \pm 0.007)R_{\max} + (0.440 \pm 0.066),$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -(0.411 \pm 0.023) Z_{\max} - (0.037 \pm 0.008),$$

其中径向丰度梯度大小居以前研究者所得结果的中值部分。我们注意到垂直于银盘方向的丰度梯度大于银盘径向的梯度。

通过对 1295 颗样本数据的分析, 肯定了丰度梯度的存在, 且显示出法向梯度大于径向梯度。不同的光谱型、光度型样本其梯度变化存在一定规律, 盘族星、晕族星, 年轻星、高年龄星丰度有所不同。这些结果支持了在银河系早期晕族恒星先于盘族恒星形成、厚盘恒星先于薄盘恒星形成的化学演化模型。

这仅是我们大样本元素丰度统计工作的开始。今后, 不但要对 Fe 丰度进行统计分析, 对 O, Ne, S, Ar 等对研究银河系演化有重要意义的元素也要进行分析, 使我们对银河系内的化学元素形成及丰度分布有更深刻的理解。

致谢 作者崔辰州感谢北京天文台的陆雨及胡景耀、乔琪源先生。他们有益的建议和讨论对本文的完成提供了很大帮助。

参 考 文 献

- 1 Shaver P A, McGee R X, Newton L M, et al. The galactic abundance gradient. *MNRAS*, 1983, 204: 53~112
- 2 Amnuel P R. The features of chemical abundances in Galactic planetary nebulae. *MNRAS*, 1993, 261: 263~282
- 3 Maciel W J, Köppen J. Abundance gradients from disk planetary nebulae: O, Ne, S and Ar. *A&A*, 1994, 282: 436~443
- 4 Maciel W J. Abundance gradients from planetary nebulae in the galactic disk. *IAU Samp*, 1997, 180: 397~404
- 5 Maciel W J, Quireza C. Abundance gradients in the outer galactic disk from planetary nebulae. *A&A*, 1999, 345: 629~634
- 6 Lennon D J, Dufton P L, Fitzsimmons A, et al. Dolidze 25: a metal-deficient galactic open cluster. *A&A*, 1990, 240: 349~356
- 7 Fitzsimmons A, Dufton P L, Rolleston W R J. A comparison of oxygen and nitrogen abundances in young clusters and associations and in the interstellar gas. *MNRAS*, 1992, 259: 489~493
- 8 Kilian J, Montenbruck O, Nissen P E. The galactic distribution of chemical elements as derived from B-stars in open clusters. *A&A*, 1994, 284: 437~446
- 9 Kaufer A, Szeifert Th, Krenzin R, et al. The galactic abundance gradients traced by B-type stars. *A&A*, 1994, 289: 740~748
- 10 Smartt S J, Dufton P L, Rolleston W R J. A metal deficient early B-type star near the edge of the galactic disk. *A&A*, 1996, 305: 164~170
- 11 Smartt S J, Dufton P L, Rolleston W R J. The chemical composition towards the galactic anti-centre. *A&A*, 1996, 310: 123~131
- 12 Binette L, Dopita M A, D'Odorico S, et al. The galactic abundance gradient from supernova remnant observations. *A&A*, 1982, 115: 315~320
- 13 Dauphole B, Geffert M, Colin J, et al. The kinematics of globular clusters, apocentric distances and a halo metallicity gradient. *A&A*, 1996, 313: 119~128
- 14 Marsakov V A, Shevelev Yu G. Catalogue of ages, metallicities, orbital elements and other parameters for nearby F stars. *BICDS*, 1995, 47: 13~15
- 15 Cayrel de Strobel G, Soubiran C, Friel E D, et al. A catalogue of $[\text{Fe}/\text{H}]$ determinations: 1996 edition. *A&AS*, 1997, 124: 299~305
- 16 Barbier-Brossat M, Petit M. Catalogue bibliographique de vitesses radiales stellaires. *A&AS*, 1990, 85: 885~888
- 17 Andersen J, Nordstrom B. Radial velocities of bright southern stars. V-146 population II F stars and related stars. *A&AS*, 1985, 62: 355~363
- 18 Nordström B, Anderson J. Radial velocities of bright southern stars. IV-551 A- and F-type HR and FK stars. *A&AS*, 1985, 61: 53~

73

- 19 Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al. The hipparcos catalog. *A&A*, 1997, 323: L49 ~ L52
- 20 Allen C, Martos M A. A simple realistic model of the galactic mass distribution for orbit computations. *RMAA*, 1986, 13: 137 ~ 147
- 21 Allen C, Santillán A. An improved model of the galactic mass distribution for orbit computations. *RMAA*, 1991, 22: 255 ~ 263
- 22 Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, 等著. C 语言数值算法程序大全(第 2 版). 傅祖芸, 赵梅娜, 丁岩石, 等译. 北京: 电子工业出版社, 1995. 599 ~ 611
- 23 Johnson D R H, Soderblom D R. Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. *AJ*, 1987, 93: 864 ~ 867