第 32 卷第 5 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 32, No. 5
2011 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2011

文章编号：1008-1542(2011)05-0431-04

极贫金属环境下超新星爆发的中子俘获元素核合成产量

马文娟[1]，单　勇[1]，张　波[2]

(1. 沧州师范学院物理与电子信息系，河北沧州　061001；2. 河北师范大学物理科学与信息工程学院，河北石家庄　050016)

摘　要：极贫金属环境下超新星爆发([Fe/H]<−2.5)形成于星系演化的早期，研究极贫金属环境下超新星爆发的重元素丰度分布及核合成，对于探索星系形成及化学演化和核天体物理学中的基本问题都起着关键作用。分析了大量极贫金属环境下超新星爆发的元素丰度的观测数据，得出中子俘获元素 Sr，Y 和 Ba 与元素 Si 的相关性规律，计算了极贫金属环境下超新星爆发的元素 Sr，Y 和 Ba 的核合成产量。

关键词：极贫金属环境下超新星；中子俘获元素；元素丰度；核合成产量

中图分类号：P148　　**文献标志码**：A

Nucleosynthetic yield of neutron-capture elements from extremely metal-poor stars

MA Wen-juan[1], SHAN Yong[1], ZHANG Bo[2]

(1. Department of Physics and Electronic Information, Cangzhou Normal University, Cangzhou Hebei 061001, China; 2. College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050016, China)

Abstract: The extremely metal-poor stars ([Fe/H]<−2.5) was formed in the early universe. Studies on the nucleosynthesis yield of the extremely metal-poor stars play a key role in the exploration of the formation of the solar system, the chemical evolution of galaxies and the fundamental issues in the nuclear astrophysics. In this paper, the neutron-capture element's nucleosynthesis yields of the extremely metal-poor stars are calculated on the basis of the observed correlations between the neutron-capture process elements Sr, Y, Ba and Si elements and the theoretical yields of Si.

Key words: extremely metal-poor stars; neutron-capture element; element abundance; nucleosynthesis

元素丰度是指各种化学元素及其同位素的相对含量，常以各元素的原子数与氢原子数(取 $N(H)=10^{12}$)比值的对数，即用 $\lg\varepsilon(A)=\lg(N(A)/N(H))+12$ 来表示。研究各类天体的元素和核素丰度分布规律可为进一步研究恒星形成历史及天体演化提供非常重要的线索。重元素(比 Fe 族元素重的元素)是由铁峰元素通过俘获中子而生成的，主要有慢中子俘获过程(s-过程)和快中子俘获过程(r-过程)。其中：r-过程主要发生在爆炸的天体物理环境，如超新星爆发[1]；s-过程主要发生在渐近巨星支(AGB)阶段宁静的 He 燃烧环境。

极贫金属环境下超新星爆发([Fe/H]<−2.5)形成于星系演化的早期阶段，其中子俘获元素丰度与恒

收稿日期：2011-04-21；修回日期：2011-09-05；责任编辑：张士莹
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10673002)；河北省教育厅科研项目(z2010108)；沧州市科技局科研项目(10ZD19)
作者简介：马文娟(1972-)，女，河北沧州人，讲师，硕士，主要从事天体物理方面的研究。

星形成及演化有密切关系，为研究星系形成早期的历史背景和化学演化提供了重要信息。对极贫金属环境下超新星爆发的重元素的丰度分布及核合成进行研究，对于探索星系的形成及化学演化和解决核天体物理学中的基本问题起着关键作用[1]。因此对其核合成研究一直都是天体物理的主要课题[2-11]。

1998年，SHIGEYAMA等指出极贫金属环境下超新星爆发产生于单个超新星污染的星云中，利用各元素丰度间观测上的相关性可确定超新星爆发核合成元素的产量[3]。文中给出了发生在原始金属丰度的星际介质中，超新星爆发遗迹污染的星云中H质量的计算公式；还指出利用极贫金属环境下超新星爆发中O的丰度，能最好地预测极贫金属环境下超新星爆发中的元素来自单个超新星事件，并由此推算超新星爆发其他元素产量。TSUJIMOTO等给出了利用极贫金属环境下超新星爆发中各元素观测丰度间的相关性来确定超新星元素产量的具体方法和步骤[4]。2000年，ARGAST介绍了一种计算晕中星际介质化学增丰的随机模型，指出在极贫金属环境下单个超新星事件只影响它的周围区域，所以它的遗迹反映了由特定坍缩超新星产生的丰度模型[7]。文中指出坍缩超新星的爆发能几乎不依赖其前身星质量，由此得出每一个Ⅱ型超新星爆发所扫过的气体质量接近一个常数，约为5×10^4 $M_\odot$。2007年，研究人员(以下简称TUN2007[11])采用fall-back模型，根据流体力学原理，完成了普通核坍缩和超大质量超新星的核合成计算，得到了主序星质量M(13～50 $M_\odot$)的超新星核合成产量[11]。

笔者分析了大量的极贫金属环境下超新星爆发的中子俘获元素与Si丰度的观测数据资料[12-26]，利用TUN2007给出的极贫金属环境下超新星爆发的元素Si的产量，采用文献[27]中马文娟等提出的方法，从理论上得到了极贫金属环境下各种质量超新星的中子俘获元素产量。

1 计算方法

2007年，马文娟等指出利用类似文献[4](简称Tsujimoto98[4])的方法能简捷有效地计算Ⅱ型超新星的元素核合成产量[27]。文中指出因为不同研究小组给出的各种质量Ⅱ型超新星Mg的理论产量以及理论产量和观测约束之间的差别较大，最大相差8倍，而O和Si符合较好[8,10-12]；而且对于这2个元素，不同研究小组给出的理论产量差异也较小，仅在质量很大时相差约2倍，但同时观测到O和其他元素的丰度在极贫金属环境下超新星爆发的数目很少，所以利用极贫金属环境下超新星爆发的Si产量作为标准可更准确地得到Ⅱ型超新星其他元素的产量。笔者利用一些最新的观测数据[12-26]，分析得到极贫金属环境下超新星爆发的Sr，Y，Ba和Si元素观测丰度的相关性，以TUN2007给出的Ⅱ型超新星元素Si的理论产量为标准，采用和TSUJIMOTO98类似的方法计算了极贫金属环境下各种质量超新星的中子俘获元素的产量。

M_{ms}-[Si/H]关系见表1，计算的具体步骤如下[27]。

对表1中对应主序质量的每一颗星(第1列)，根据TUN2007[11]的超新星爆发时抛射的Si元素的理论产量(表1中第2列)，由元素丰度[Si/H]=lg(N(Si$_*$)/N(H$_*$))－lg(N(Si$_\odot$)/N(H$_\odot$))=lg(M(Si$_*$)/M(Si$_\odot$))(N(Si)指元素Si的数丰度，M(Si)指元素Si的质量丰度，脚标＊和⊙分别代表恒星和太阳)得出给定超新星质量污染的星云的Si的丰度比[Si/H](表1中第3列)。由观测数据[12-26](只取其中[Fe/H]＜－2.5的极贫金属晕星的观测数据，选取数据时遵循尽量最新、避免观测的选择效应、权威性、多引用率的原则)，利用最小二乘法拟合[元素/H]-[Si/H]关系，见图1。综合[元素/H]-[Si/H]关系和不同质量超新星质量污染的星云的Si的丰度比[Si/H]，得出[元素/Si]-M_{ms}对应关系。最后由元素Si的产量推出各种质量超新星Sr，Y，Ba的产量。

表1 M_{ms}-[Si/H]关系

Tab.1 Relation of M_{ms} with [Si/H]

M/M$_\odot$	M_{Si}/M$_\odot$	[Si/H]
13	0.08	－2.65
15	0.07	－2.71
18	0.10	－2.54
20	0.09	－2.60
25	0.22	－2.22
30	0.24	－2.18
40	0.72	－1.71
50	0.36	－2.01

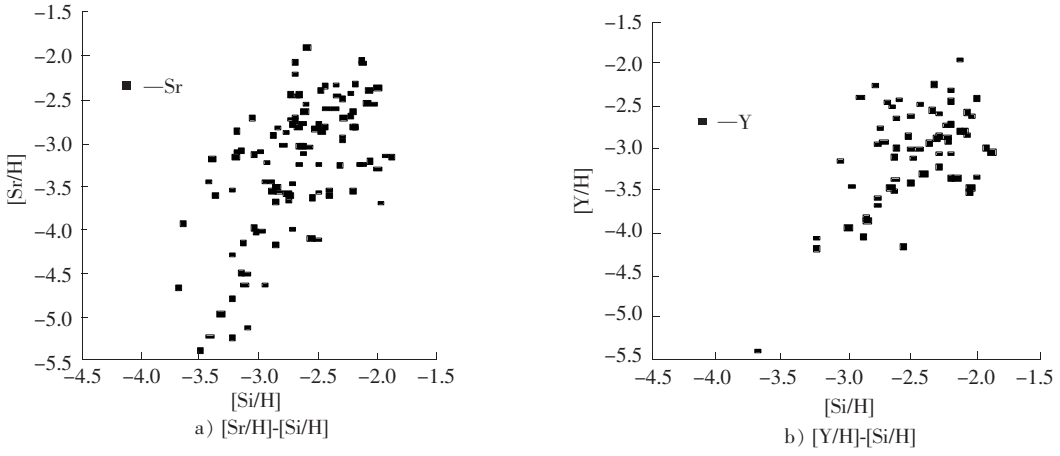

图 1　极贫金属环境下 [Sr/H]-[Si/H]和[Y/H]-[Si/H]关系

Fig. 1　Relation of [Sr/H]-[Si/H] with [Y/H]-[Si/H] for the extremely metal-poor star

2　极贫金属环境下超新星爆发的 Sr,Y 核合成产量

图 2 为极贫金属环境下超新星爆发的 Sr,Y 的核合成产量(其中■为文献[10](以下简称 CL2004[10]给出的产量,▲为本文所得产量)。质量 M_* 小于 40 $M_\odot$ 范围内,随超新星前身星质量的增加,元素 Sr 和 Y 的核合成产量逐渐增加,在 40 $M_\odot$ 附近达到最大值;大于 40 $M_\odot$ 时,核合成产量随前身星质量的增加而减小。

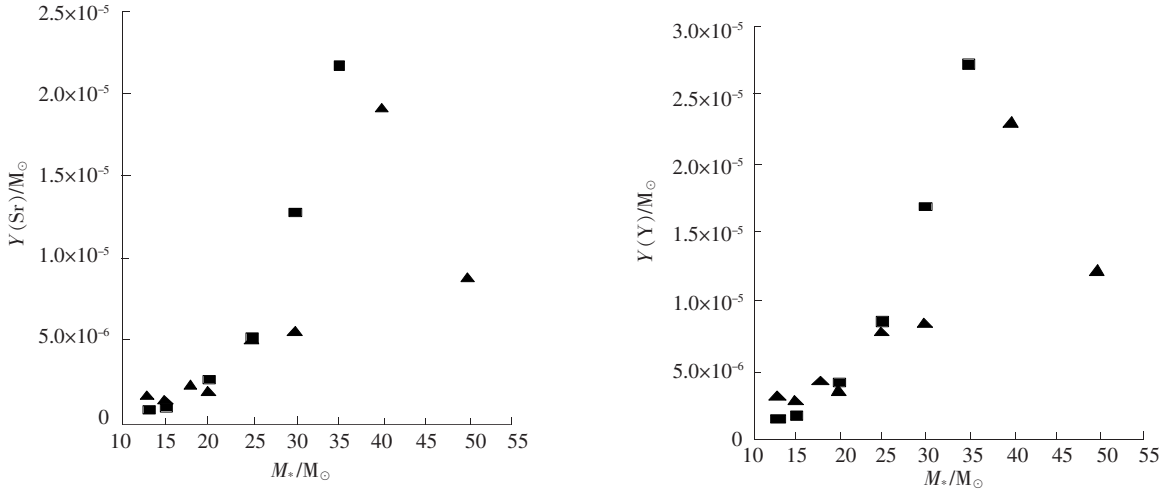

图 2　极贫金属星超新星爆发的 Sr,Y 的产量

Fig. 2　Supernova yields of Sr, Y for the extremely metal-poor stars

CL2004 把物理方程的积分应用到核演化的描述中,研究了 13～35 $M_\odot$ 的恒星的核素产量,指出低金属丰度下核素的产量不依赖于恒星的初始化学组成。可以看出:本文所得结果与 CL2004 的值相比只是在 30 $M_\odot$ 偏差较大,相差近 2 倍,在其他质量时两者符合较好。这也验证了笔者的模型和方法用于计算极贫金属环境下超新星爆发的核合成产量是合适的,用这种方法可以进一步计算较重中子俘获元素的产量。

3　极贫金属环境下超新星爆发的元素 Ba 的核合成产量

极贫金属环境下超新星爆发的[Ba/H]-[Si/H]的关系如图 3 所示,图 4 给出了得到的极贫金属环境较重中子俘获元素 Ba 的产量和超新星前身星质量 M_{ms} 的关系。可以看出:元素 Ba 的核合成产量随着超新星前身星质量 M_{ms} 的增加而增加,在 $M_{ms}=40$ $M_\odot$ 达到最大值,为 1.69×10^{-6} $M_\odot$,与 2002 年 FIELDS 的计算结果(1.4×10^{-6} $M_\odot$)基本一致[8]。从图 4 中可以看出产量较高的Ⅱ型超新星质量区间为 35～40 $M_\odot$。

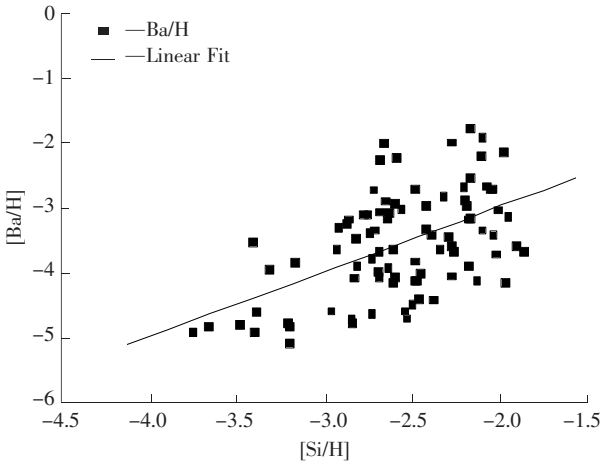

图3 极贫金属环境下的[Ba/H]-[Si/H]的关系

Fig. 3 Relation of [Ba/H] with [Si/H] for the extremely metal-poor star

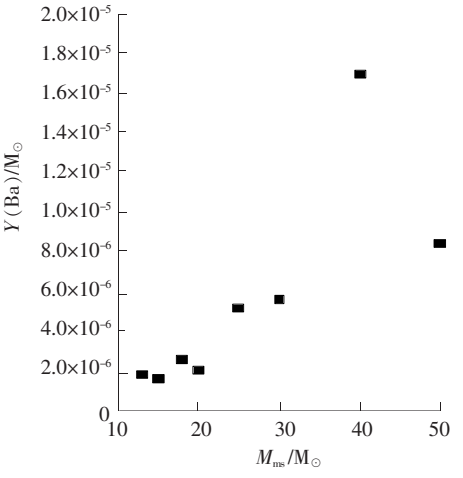

图4 Ba的产量与M_{ms}的关系

Fig. 4 Relation of yield of Ba with M_{ms}

由于极贫金属环境下超新星爆发的较重中子俘获元素产量可能来自于纯r-过程[1]，笔者认为从星系化学演化的角度来讲，同时考虑Ⅱ型超新星r-过程的产量$Y_*(m)$与初始质量函数(IMF)$\varphi(m)$，用$Y_*(m)\times\varphi(m)$来判断星系化学演化中r-过程的主要产量区间更为合理，计算结果由图5给出，为35～40 $M_\odot$，不同于1999年TRAVAGLIO提出的星系r-过程元素主要来自低质量(8～10 $M_\odot$)Ⅱ型超新星的结果[5]。

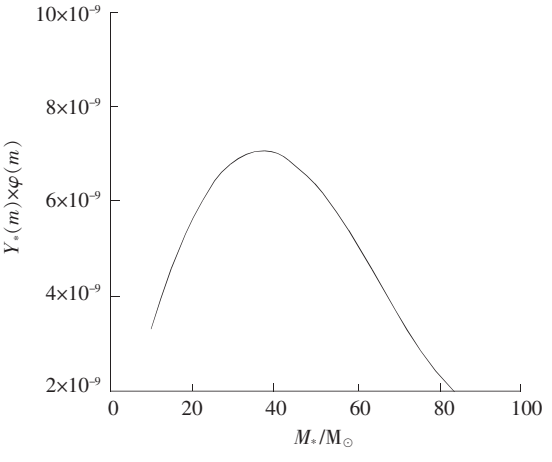

图5 $Y_*(m)\times\varphi(m)$与M_*的关系

Fig. 5 Relation of $Y*(m)\times\varphi(m)$ with M_{ms}

3 结 论

利用大量最新的观测数据，以TUN2007给出的Si的理论产量为标准，重新计算了极贫金属环境下各种质量超新星的Sr，Y，Ba产量，所得的主要结论如下。

1)在质量小于40 $M_\odot$时，随着超新星前身星质量的增加，较轻中子俘获元素Sr和Y的产量逐渐增加，在40 $M_\odot$附近达到最大值，大于40 $M_\odot$时，核合成产量随前身星质量的增加而减小。

2)r-过程元素核合成产量随超新星前身星质量的增加而增加，在40 $M_\odot$时达到最大值，Ba的产量可达1.69×10^{-6} $M_\odot$，所得结果与2002年FIELDS的结果基本一致[8]。r-过程产量较高的Ⅱ型超新星质量区域为35～40 $M_\odot$。

参考文献：

[1] 张 波，李 冀. 贫金属星中子俘获元素丰度[J]. 天文学进展(Progress in Astronomy)，2000，18(3)：238-248.

[2] WOOSLY S E，WEAVER T A. The evolution and explosion of massive stars(Ⅱ)：Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis[J]. APJ，1995，101：181-200.

[3] SHIGEYAMA T，TSUJIMOTO T. Fossil imprints of the first generation supernova ejecta in extremely metal-deficient stars[J]. APJ，1998，507：135-139.

[4] TSUJIMOTO T，SHIGEYAMA T. New insights into the early stage of the galactic chemical evolution[J]. APJ，1998，508：151-154.

[5] TRAVAGLIO C. Galatic chemical evolution of heavy elements：From barium to europium[J]. APJ，1999，521：691-702.

[6] TSUJIMOTO T，SHIGEYAMA T，SUPERNOVA S N. 1987A revisited as a major production site for r-process elements[J]. APJ，2001，561：97-100.

(下转第465页)

[5] KHALILI K, ZOMLEFER M. An intelligent robotic system for rehabilitation of joints and rstimation of nody degment parameters[J]. IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 1988,35(2):138-146.

[6] RASYID H N, MENGB T R, SOEGIJOKA S J, et al. Design and realization of personal computer based continous passive motion device to prevent shoulder joint stiffness[A]. The 2004 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems[C]. Taiwan:[s. n.], 2004.

[7] WEIR R F, AJIBOYE A B. A multifunction prosthesis controller based on fuzzy-logic techniques[A]. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS[C]. Cancun: [s. n.], 2003. 1 678-1 681.

[8] SCHMIDT H, PIORKO F, BERNHARDT R, et al. Synthesis of perturbations for gait rehabilitation robots[A]. Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics[C]. Chicago: [s. n.], 2005.

[9] **潘　旺. 足关节康复机器人系统设计与开发**[D]. **秦皇岛:燕山大学**,2007.

[10] **于海波. 并联式踝关节康复机器人系统设计**[D]. **秦皇岛:燕山大学**, 2006.

[11] **段学习. 基于** 3-SPS/PS **机构四维力传感器研究与仿真**[D]. **秦皇岛:燕山大学**,2009.

[12] **段学习,王蕴岭,汪　琦. 脚踝康复受力测量电路的设计**[J]. **电子测量技术**(Electronic Measurement Technology),2010,33(7):8-10.

[13] **汪　琦,段学习,闫江涛,等. 压力保护支具在老年股骨粗隆间骨折术后康复训练中的应用**[J]. **中国综合临床**(Clinical Medicine of China),2011,27(1):19-22.

(上接第 434 页)

[7] ARGAST D. Metal-poor halo stars as tracers of ISM mixing processes during halo formation[J]. A & A, 2000,356:873-887.

[8] FIELDS B D. A simple model for r-process scatter and halo evolution[J]. APJ, 2002,575:845-854.

[9] FRANCOIS P. The evolution of the milky way from its earliest phases:Constraints on stellar nucleosynthesis[J]. A & A,2004,421:621-631.

[10] CHIEFFI A, LIMONGI M. Explosive yields of massive stars from $Z=0$ to $Z=Z$ solar[J]. APJ, 2004, 608:405-410.

[11] NOZOMU T. Supernova nucleosynthesis in population Ⅲ: 13～50 $M_{\odot}$ stars and abundance patterns of extremely metal-poor stars[J]. APJ, 2007,660: 516-540.

[12] GRATTON R G, SNEDEN C. Abundances in extremely metal-poor stars[J]. A & A, 1988, 204: 193-218.

[13] RYAN S G. Subdwarf studies Ⅳ: Abundance ratios in extremely metal-deficient stars[J]. APJ, 1991,102:303-322.

[14] PRIMAS P. Abundances of four very metal-poor stars of the bps survey[J]. A & A,1994,290:885-896.

[15] MCWILLIAM A. A spectroscopic analysis of the most metal-poor stars[J]. APJ,1995,109:2 736-2 756.

[16] RYAN S G,NORRIS J E, BEER T C. Extremely metal-poor stars Ⅱ: Elemental abundances and the early chemical enrichment of the galaxy[J]. APJ, 1996, 471: 254-278.

[17] NORRIS J E,RYAN S G,BEERS T C. Extremely metal-poor stars Ⅷ: High-resolution, high-signal-to-noise analysis of five stars with [Fe/H] <-3.5[J]. APJ, 2001,561:1 034-1 059.

[18] CARRETTAN E. Stellar archaeology: A keck pilot program on extremely metal-poor stars from the hamburg/ESO survey Ⅱ: Abundance analysis[J]. APJ, 2002, 124:481-498.

[19] CAYREL R. First stars V: Abundance patterns from C to Zn and supernova yields in the early galaxy[J]. A & A,2004,416:1 117-1 138.

[20] HONDA S. Spectroscopic studies of extremely metal-poor stars with subaru/HDS Ⅱ:The r-process elements, including thorium[J]. APJ,2004,607:474-498.

[21] AOKI W,NORRIS J E. Oxygen overabundance in the extremely iron-poor star CS29498-043[J]. APJ,2004,608:971-977.

[22] AOKI W. Spectroscopic studies of very metal-poor stars with the subaru high dispersion spectroscopic Ⅲ:Light neutron-capture elements [J]. APJ, 2005,632:611-637.

[23] BONIFACIO P. First stars Ⅶ:Abundances in extremely metal-poor turnoff stars,and comparison with the giants[J]. A & A,2009,501: 519-530.

[24] SIMON E. High-resolution spectroscopy of extremely metal-poor stars in the least evolved galaxies: LEO Ⅳ[J]. APJ,2010,716: 446-452.

[25] HODA E. Spectroscopic studies of extremely metal-poor stars with the subaru high dispersion spectrograph Ⅴ:The Zn-enhanced metal-poor star BS16920-017[J]. APJ,2011,730:77-82.

[26] HANSEN T. First stars Ⅷ:Two extremely metal-poor RR lyrae stars[J]. A & A,2011, 527A:65-70.

[27] **马文娟, 周贵德, 张　波. 极贫金属环境下超新星爆发的元素丰度及** Ⅱ **型超新星核合成产量**[J]. **天文研究与技术**(Astronomical Research and Technology),2007(2):95-101.

[28] MATHEWS G J, BAZAN G, COWAN J J. Evolution of heavy-element abundances as a constraint on sites for neutron-capture nucleosynthesis[J]. APJ, 1992, 391: 719-735.

[29] **张凤华,张　波. 中子幅照量指数分布函数式中比例系数的确定**[J]. **河北科技大学学报**(Journal of Hebei University of Science and Technology),2003,24(3):7-9.

[30] **张凤华,张　波.** AGB **星** s-**过程核合成:中子幅照量渐近分布**[J]. **河北科技大学学报**(Journal of Hebei University of Science and Technology),2004,25(4):11-14.