

转基因小鼠乳腺表达人乳过氧化物酶的初步研究

A Preliminary Study on Transgenic Mouse Model of Human Lactoperoxidase

余珊珊/YU Shan-shan¹, 王毅彰/WANG Yi-zhang², 于舒洋/YU Shu-yang¹, 李 宁/LI Ning¹

1. 中国农业大学农业生物技术国家重点实验室, 北京 100094

2. 安阳师范学院地理系, 河南安阳 455002

1. State Key Laboratories for Agrobiotechnology College of Biological Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China

2. Department of Geography, Anyang Normal College, Anyang 455002, Henan Province, China

[摘要] 从人基因组 PAC 文库中筛选出人乳过氧化物酶(hLPO)基因,利用长片段 PCR 的方法获得 hLPO 基因 5' 端约 3kb 片段,通过酶切方法获得 hLPO 基因 3' 端约 27 kb 片段,将这两部分拼接并克隆到乳腺特异性表达载体 pBC 1 上,构建以山羊 β -casein 启动区指导的 hLPO 的转基因表达载体 pBC 1-hLPO。利用显微注射的方法获得 28 只 F₀ 代小鼠,经 PCR 检测和 Southern 杂交分析证实,有 5 只小鼠(4♂, 1♀)为整合 hLPO 基因的转基因阳性小鼠,整合率为 17.86%,整合拷贝数在 1 至 5 之间。利用 SDS-PAGE 凝胶电泳和 Western blot 印迹分析 F₀、F₁ 代共 3 只雌性转基因小鼠乳样,结果表明 hLPO 重组蛋白的特异条带不明显。

[关键词] 人乳过氧化物酶(hLPO),转基因小鼠,显微注射

[中图分类号] Q344

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)08-0031-04

Abstract : Human Lactoperoxidase gene (hLPO) has been cloned into pBC1 to construct pBC1-hLPO specialized expression vector in mammary glands. Human LPO gene was assembled by two gene fragments, which are 3 kilo base pairs in length and 27 kilo base pairs long respectively. The shorter one was amplified by long-distance PCR and the other was cut down by restriction AgeI, both based on the donor of PAC RP5-1171110 plasmid that contains hLPO gene. Here, We established the transgenic mouse model by microinjection into fertilized eggs, and then obtained 5 transgenic mice (4male, 1female) out of 28 descendants, identified by PCR and Southern blot. The integration rate is 17.86%, and lactoperoxidase expression levels were determined by SDS-PAGE gel electrophoresis and Western blot. The hLPO recombinant protein band is not obvious as the antibodies are not very specific.

Key Words : human lactoperoxidase (hLPO), transgenic mouse, microinjection

CLC Number : Q344

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)08-0031-04

1 引言

1943 年,Theorell 及 Akesson 从乳中将过氧化物酶分离纯化,并命名为乳过氧化物酶(Lactoperoxidase, LPO)。乳过氧化物酶是一种多功能的防御蛋白,属于哺乳动物亚铁血红素超家族^[1],广泛存在于各种哺乳动物乳汁及其它分泌物中。LPO 基因长 33 kb,包括 12 个外显子和 11 个内含子。LPO 与 H₂O₂、卤化物或类卤化物(X⁻, SCN⁻)一起构成乳过氧化物酶系统(Lactoperoxidase System, LPS)^[2]。LPO 催化氧化卤化物形成

次卤酸(XO⁻, OSCN⁻),产物次卤酸是一种细胞毒素,能与蛋白交联,抑制酶和细胞因子的活性,起到免疫监视和机体防卫的作用。LPS 是一种天然的、具有实际应用价值的抗菌体系,在杀死或抑制细菌的一系列反应的同时,可以清除对机体有害的氧自由基,是哺乳动物防卫系统中的重要组成部分。

人哺乳期的各个阶段的乳中都有乳过氧化物酶表达^[3]。但是人乳中的 hLPO 表达量很低,只占人乳中所有蛋白总量的 0.004%,且常乳中的含量远低于初乳,在生

产 1 周后降低至几乎检测不到,其表达水平可能受生产前后表达水平变化较大的一些激素和因子的调节。

鉴于 hLPO 重要的功能和应用价值及人乳中表达较低等特点,利用乳腺特异性的高效率山羊 β -casein 的调控区改造人乳过氧化物酶基因,并制备转基因小鼠模型,分析其表达情况并检测其活性,为进一步分析天然状态下 hLPO 微量表达的机理、利用乳腺生物反应器大量生产这种具有重要功能的蛋白奠定基础。

收稿日期: 2005-07-07

基金项目: 国家科技部“863”计划重大专项(2002AA206111)

作者简介: 余珊珊,女,北京海淀区圆明园西路 2 号中国农业大学农业生物技术国家重点实验室,硕士生,主要从事转基因动物研究;

E-mail: yss@cau.edu.cn

李 宁(通讯作者),男,北京海淀区圆明园西路 2 号中国农业大学农业生物技术国家重点实验室,教授,主要从事动物分子遗传研究; E-mail: ninglbau@public3.bta.net.cn

2 材料和方法

2.1 实验材料

实验动物用昆明小白鼠或 BALB/c, 购自国家计划生育研究所动物部。所用到的药品和试剂包括: 内切酶及其它酶类 *Not* I、*Sal* I、*Bgl* II 为 Promage、Biolabs、华美、大连宝生物公司产品; T4 DNA ligase 为 Biolabs 公司产品; 蛋白酶 K 及 RNase 为 Sigma 公司产品; IPTG、X-gal、氨苄青霉素 (Amp)、卡那霉素 (Kan) 均购自华美生物公司; 饱和酚购自鼎国生物工程公司; Tris、EDTA 及胚胎培养基成份均为 Sigma 公司产品; 其它生化试剂多为国产分析纯产品。放射性同位素 α -32P-dCTP 购自亚辉生物工程公司。多肽合成及连接由武汉三鹰生物技术有限公司完成。

2.2 pBC 1-hLPO 表达载体的构建

利用探针从人基因组 PAC 文库里调取含有人乳过氧化物酶基因的 PAC 克隆: PAC RP 5-1171 I 10。根据 GenBank 上公布的 PAC RP 5-1171 I 10 序列设计引物含有引物 k60 f(上游): 5'AAG CCG CCG CTA TGA ACA CCG GTT TTG TGG C 3', 包含 *Not* I (实线) 和 *Age* I (虚线) 酶切位点; k60r (下游): 5'GCT GGC CTC GAG CAT CTC GTT TCA GTG ATG AG 3' 包含 *Xho* I (实线) 酶切位点、ATG 翻译起始位点及类 Kozak 位点, k60 扩增获得人乳过氧化物酶基因的 5'端 3 kb 片段; PCR 条件: 94 °C 5min, 94 °C 45 sec, 60 °C 50 sec, 68 °C 3 min, 68 °C 7 min, 4 °C ∞ ; 35 cycles。PCR 片段连接到 PCR-XL-TOPO 载体上得到 pTOPO-hLPO 5'重组载体, 酶切测序鉴定筛选正确的阳性克隆。同时对 pBC 1 和 pTOPO-hLPO 进行 *Xho* I、*Not* I 双酶切, 两者回收片段按 1:3 比例 16 °C 连接过夜电击转化。挑单克隆菌落摇菌提取质粒, 提出的质粒 *Xho* I、*Not* I 双酶切和 PCR 鉴定, 再用 *Not* I 和 *Sal* I 双酶切检查插入方向, 测序检测插入片段保真度, 筛选重组质粒 pBC 1-hLPO 5'阳性克隆。

用 *Age* I 酶切 PAC RP 5-1171 I 10 和 pBC 1-hLPO 5', 回收片段按 1:3 的比例 16 °C 连接过夜, 再进行电转化。挑单克隆菌落进行摇菌提取质粒, 设计 2 对引物做

PCR 检测, k46f (上游):

5'TTC TAT CTT CCA

CCC TTT AC 3'; k46r (下

游): 5' GAC TTG TCC

CTG ACT CCA 3'; PCR

条件: 94 °C 5 min, 94 °C

45 sec, 58 °C 1min, 72 °C

90 sec, 72 °C 7 min, 4 °C

∞ ; 30 cycles。k43f(上游):

5' AAA CCG TGT CAT

CAC CTC 3'; k43r (下游): 5'GAC TTT GGG

ATA GAC TGA CGG 3'; PCR 条件: 94 °C 5

min, 94 °C 30 sec, 52 °C 1min, 72 °C 1 min,

72 °C 7 min, 4 °C ∞ ; 30 cycles。k46 扩增区

域位于连入 27 kb3' 末端, 扩增片段长 1.5

kb; k43 扩增区域位于人 LPO 基因内含子

3, 跨越 LPO 基因 5'端 3 kb 的 3'末端和连

入 27 kb5'前端, 扩增片段长 1.2 kb。BamH

I, Cal I, Kpn I, Xho I 分别单酶切鉴定方

向, 各外显子进行测序检测其保真性。

2.3 转基因小鼠的制备^[4]

电洗脱法回收 *Not* I 和 *Sal* I 双酶切

pBC-hLPO 表达载体的 DNA 片段, 大小为

38.7 kb, 透析纯化后稀释至 2 ng/ μ l, 注射

小鼠受精卵的雄原核, 然后移植于同期发

情的假孕母鼠的输卵管中。

2.4 阳性转基因小鼠传代

阳性小鼠与正常的非转基因小鼠配

种, 用上述的 3 对引物 k46、k43、k52 做

PCR 检测后代小鼠, 检查转基因结构的遗

传稳定性。

2.5 目的基因整合的鉴定

取 2~3 周龄小鼠的尾巴组织样, 提取

基因组 DNA。根据显微注射的 DNA 片段

的上游启动子序列设计引物 k52f (上游): 5'

ATG CAG AAG AGC CAA CTC C'; k52r(下

游): 5'GAG TGG TGG CAG TGG TT AG 3',

扩增片段长 0.8 kb。用 3 对引物 k43、k46、

k52 进行 PCR 检测。PCR 检测为阳性的个

体进一步作 Southern 杂交验证。Bgl II 单酶

切 pBC 1-hLPO 表达载体, 得到的一条 5 kb

片段做探针, 用 α -³²PdCTP 同位素标记探针

后, 与被 Bgl II 单酶切后的基因组杂交, 对

照为浓度按梯度比例设置的阳性质粒。

2.6 抗体制备

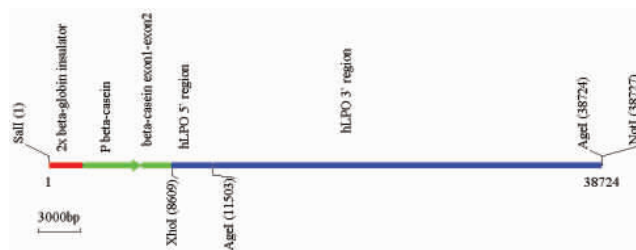


图 1 人乳过氧化物酶基因表达载体 pBC1-hLPO 的物理图谱

根据人乳过氧化物酶的三级预测结构, 设计合成多肽 CSAID KLDLSPWASV KN, 与载体蛋白 KLH 偶联后免疫家兔^[5], 用 ELISA 方法检测抗血清, 抗体效价可以用于转基因小鼠乳样的 Western blot 检测。

2.7 人乳过氧化物酶在转基因小鼠乳汁中表达分析

SDS-PAGE 凝胶电泳分析小鼠乳汁全乳样品, Western blot 印迹法检测人乳过氧化物酶在小鼠乳汁中表达。

3 实验结果与分析

3.1 pBC1-hLPO 表达载体的构建和鉴定

基因编码区由山羊酪蛋白强启动子启动转录, 包含山羊酪蛋白基因的强终止子, 非编码外显子 1、2、7、8、9, 内含子 1、7、8 和鸡 β -球蛋白隔离子, 双酶切后的线性结构模式如图 1。BamH I, Cal I, Kpn I, Xho I 酶切鉴定结果表明, 重组质粒为正向型阳性重组质粒, 乳过氧化物酶基因外显子部位测序结果也表明外显子 DNA 序列没有改变(结果未列出)。

3.2 转基因小鼠人乳过氧化物酶基因的整合

显微注射受精卵 1 445 枚, 移植受体鼠 45 只, 获得的 28 只 F0 代小鼠, 包括 14 只公鼠和 14 只母鼠。进行 PCR 检测的共有 5 只小鼠, 均为转基因阳性小鼠(图 2), 分别为 2、5、14、17 和 18 号, 5 号是母鼠, 其它均是公鼠。k46、k43、k523 对引物检测结果一致, 外源基因整合率为 17.86%。Southern 杂交对 PCR 检测结果进行进一步确证, 结果如图 3。根据 Southern 杂交信号强度, 估算转基因小鼠的外源基因整合的拷贝数。2 号整合拷贝数为 5, 14 和 17 号整合拷贝数为

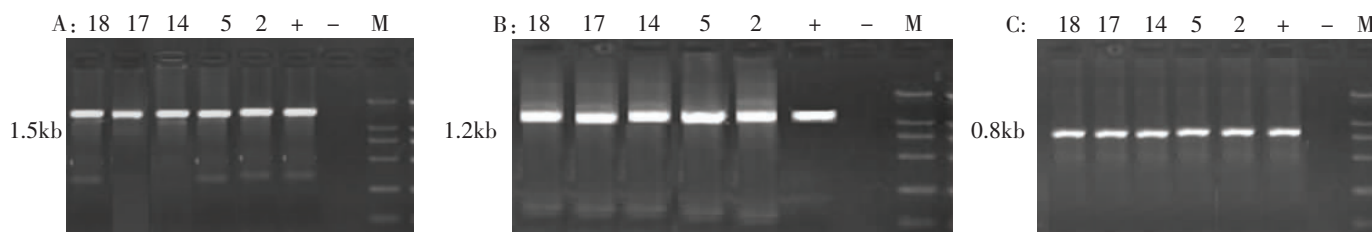


图 2 转基因阳性小鼠的 PCR 检测

(注: “-”为阴性对照, “+”为阳性对照; M: DNA 电泳分子量标准; 2、5、14、17、18 是 PCR 检测的阳性转基因小鼠编号; A、B、C 分别为 k46、k43、k52 3 对引物检测结果。)

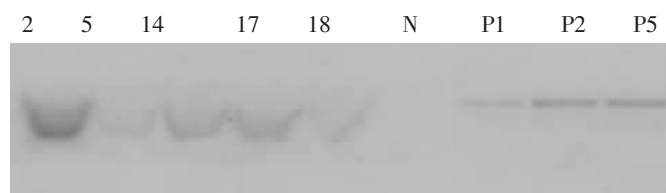


图 3 pBC1-hLPO 转基因阳性小鼠的 Southern blot 检测

(注:P1:拷贝数为1的质粒对照;P2:拷贝数为2的质粒对照;P5:拷贝数为5的质粒对照;N:阴性对照;2,5,14,17,18:转基因阳性小鼠)

2,5 号和 18 号是单拷贝。

3.3 外源基因的遗传检测

对 5 只 F0 阳性小鼠进行传代研究, 共获得 33 个 F1 代小鼠, 检测到 8 只阳性小鼠, 编号为 1、4、5、7、8(公鼠); 12、13、20(母鼠)。该结果表明, 转基因小鼠的外源基因可以遗传给后代。

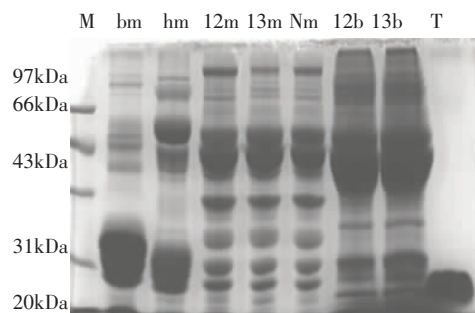
3.4 转基因小鼠乳汁中人乳过氧化物酶的表达

F1 代 12、13、20 号 3 只母鼠与野生型种公鼠配种, 12、13 号生出子代小鼠, 采集母鼠奶样做 SDS-PAGE 电泳和 Western 杂交分析(图 4)。通过杂交的结果显示, 阳性个体杂交信号与阴性转基因小鼠区别不大, 这可能是由于用过氧化物酶多肽制备的抗体特异性不明显, 不能很好地区分小鼠内源过氧化物酶和转基因外源酶; 另外也可能是因为小鼠乳腺细胞对人源乳过氧化物酶的修饰与小鼠腺细胞中的修饰不同, 导致抗体特异性识别能力降低。

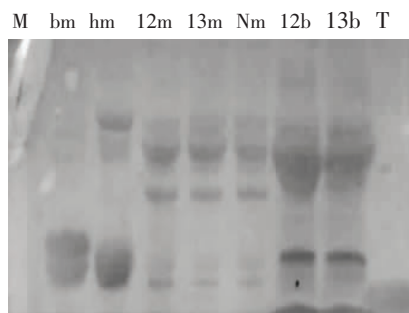
乳过氧化物酶含有 1 个血红素基团, 血红素基团需要与肽链上的 6 个氨基酸残基以共价键和氢键方式结合构成催化活性中心^[6], 而这种交联形成催化结构可能会影响酶蛋白的构象, 进而影响酶的免疫特异性^[7]。对于乳过氧化物酶这样含有辅基的大蛋白分子, 通过短肽免疫法不能获得特异性理想的抗体。

此外,人乳过氧化物酶 N 端和 C 端均有糖基修饰。蛋白糖基化具有组织特异性和物种特异性^[89]。Watanabe 在 1998 年将 LPO 转入 COS 细胞进行转基因研究时发现,重组蛋白糖基化修饰发生改变^[10]。通过小鼠乳腺表达的重组人乳铁蛋白在糖基化方面有差别^[11],用大鼠肾细胞表达的重组乳铁蛋白也出现这种情况^[12]。小鼠表达的重组乳过氧化物酶中也可能因为糖基修饰发生变化,导致抗体不能识别。

显微注射生产转基因动物, 外源基因的整合率一般是 3%~5%^[12], 对于转基因小鼠, 这个比值通常在 5%~20% 之间。在本次



(A) SDS-PAGE 电泳图



(B) Western 杂交图

图 4 SDS-PAGE 电泳和 Western 杂交分析

(注:M:蛋白质电泳分子量标准;bm:牛乳样;hm:人乳样;12m:12号阳性小鼠乳样,13m:13号阳性小鼠乳样;Nm:阴性小鼠乳样;12b:12号阳性小鼠血清样品,13b:13号阳性小鼠血清样;T:用于生产抗体的多肽样品)

4 讨论与结论

乳过氧化物酶由 712 氨基酸构成,分子量为 72 kDa,由于蛋白质较大,所以我们根据人乳过氧化物酶蛋白质序列合成了短肽,然后再用短肽制备抗体。但 Western Blot 结果显示,杂交图上显示出多种条带,说明抗体特异性不强。转基因小鼠血液阴性对照显示,抗体与血液蛋白有交叉反应。

试验中, F₀代转基因小鼠的整合率是17.86%,整合效率较高。在本实验室其它转基因小鼠模型的研究中^[14-17],转溶菌酶整合率为7.2%,转人 α -乳清蛋白达11.7%。在蜘蛛牵丝蛋白的转基因研究中,牵丝蛋白4聚体基因形式的表达载体整合率达12%,6聚体形式的表达载体整合率达17%,同样为大片段外源基因的人乳铁蛋白转基因小

鼠整合率是 9%, 这些转基因模型都是利用 pBC 1 载体作为表达载体的骨架部分, 在同样的实验操作条件下完成显微注射, 人 LPO 转基因小鼠整合率比以往模型都高。在排除了不同显微注射条件引起的误差后, 可以推测转基因小鼠的整合率还和转入基因的结构有关, 表达载体在雄原核中的存在构象可能影响外源基因的整合率。

乳过氧化物酶系统有广谱抑菌抗菌作用^[18],目前已经广泛应用于原料乳、巴氏消毒乳、酪乳、酸乳、乳浊液以及化妆品的保藏^[19]。乳过氧化物酶作用的最佳温度是 35~40 ℃,对高温地区鲜奶长时间采集和运输具有实际意义。LPS 系统对人体无毒害作用,牛乳饮用前的常规加热消毒处理,就可将残留的 OSCN-全部消除^[18]。此系统在巴基斯坦、墨西哥、肯尼亚和斯里兰卡等国已成功地用来保存鲜牛乳。乳过氧化物酶还可以用作饲料添加剂,犊牛的代乳料加工过程中,一些保护性的抗菌因子大多受热变性而失去作用。用 LPS 系统代替抗生素添加于猪、牛等动物的饲料中饲喂家畜,犊牛的采食量及生长速度都有明显改善,腹泻也大大降低^[20]。

许多病原菌引起牛乳房炎, 乳过氧化物酶可抑制这些微生物的生长繁殖。可能是通过抑制或杀死人体内的病毒, 也可能是通过降低了人免疫缺陷病毒编码蛋白质的转录, 从而利于肿瘤的治疗^[18], LPO-GO (葡萄糖氧化酶)-Ig 体系已被用于肿瘤治疗并取得较好的效果。乳过氧化物酶还可用于化妆品、眼药水、口腔卫生及伤口处理等方面^[21]。国外已有添加乳过氧化物酶系统的牙膏销售, 这种牙膏含有乳过氧化物酶与葡萄糖氧化酶、溶菌酶等成分, 具有良好的市场。由于 SCN⁻天然存在于很多食品体系中, 有关 LPS 及其组分在医药、功能性食品中的应用前景十分广阔。深入研究乳过氧化物酶的功能及乳过氧化物酶系统的作用机理, 不仅有利于我们在已有基础上更好地利用其为人类造福, 随之而来的经济价值和社会效益也相当可观。

参考文献(References)

- [1] Daiyasu H, Toh H. Molecular evolution of the myeloperoxidase family [J]. *J Mol Evol* 2000,(51): 433~445
- [2] Michael L Ott. Lactoperoxidase [J]. *Free Radi Biol Med*, 2001, 30: 222
- [3] Gothefors L, Marklund S. Lactoperoxidase activity in human milk and in saliva of newborn infants[J]. *Infect Immun*, 1975, (11): 1 210~1 215
- [4] Bridge H. Manipulating the mouse embryo, A laboratory manual [M]. New York : Cold Spring Laboratory , 1986. 81~128
- [5] Sambrook J, Fritsch E F, Maniatis T. Molecular cloning A Laboratory Manual[M].



- 2nd ed. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1989. 852~857
- [6] O'Brien P J. Peroxidases [J]. *Chem Biol Inter*, 2000,(129): 113~139
- [7] Ghibaudi E, Laurenti E, Pacchiardo C, et al. Organic and inorganic substrate as probes for comparing native bovine lactoperoxidase and recombinant human myeloperoxidase [J]. *J Inorg Biochem*, 2003, (94): 146~154
- [8] Derisbourg P, Wieruszkeski J M, Montreuil J, et al. Primary structure of glycans isolated from human leucocyte lactotransferrin. Absence of fucose residues questions the proposed mechanism of hyposideraemia [J]. *Biochem J*, 1990, 269: 821~825
- [9] Coddeville B, Strecker G, Wieruszkeski J M, et al. Heterogeneity of bovine lactotransferrin glycans. Characterization of alpha-D-Galp-(1 α 3)-beta-D-Gal- and alpha-NeuAc-(2 α 4)-beta-D-GlcNAc-substituted N-linked glycans [J]. *Carbohydrate Res*, 1992, 236: 145~164
- [10] Watanabe S, Varsalona F, Yoo Y C, et al. Recombinant bovine lactoperoxidase as a tool to study the heme environment in mammalian peroxidases [J]. *FEBS Letters*, 1998(441): 476~479
- [11] Nuijens J H, van Berkel P H C, Geerts R R P, et al. Characterization of recombinant human lactoferrin secreted in milk of transgenic mice [J]. *J Biol Chem*, 1997, 272:8 802~8 807
- [12] Stowell K M, Rodo T A, Funk W D, et al. Expression of cloned human lactoferrin in baby-hamster kidney cells[J]. *Biochem J*, 1991, 276:349~355
- [13] Clark J, Whitelaw B. A future for transgenic livestock[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2003, 4(10): 825~833
- [14] 于政权,樊宝良,戴蕴平,等. 转基因小鼠乳腺表达重组人溶菌酶[J]. 科学通报, 2003, 48 (20): 2 149~2 153
- [15] 于舒洋, 曹更生, 樊宝良. 人 α 乳清蛋白基因的克隆及其在转基因小鼠中高效表达[J]. 生物化学与生物物理进展, 2004, 31(3): 244~248
- [16] 许红韬. 拟蜘蛛牵丝蛋白基因在大肠杆菌和小鼠乳腺表达研究[D]. 北京: 中国农业大学大学生物学院, 2004
- [17] Liu Z L, Zhao C J, Fan B L, et al. Variable expression of human lactoferrin gene in mice milk driven by its 90kb upstream flanking sequences[J]. *Animal Biotechnology*, 2004, 15: 21~31
- [18] Wolfson L M. Antibacterial activity of the lactoperoxidase system [J]. *Journal of Food Protection*, 1993, 56: 887~892
- [19] 江波涛, 黄玉贤, 孟淑珍, 等. 乳过氧化物酶体系对原料奶保鲜作用的研究 [J]. 畜牧与饲料科学, 2004, (2): 51~52
- [20] 张和平. 乳过氧化物酶的作用及应用[J]. 中国奶牛, 1994, (4): 52~55
- [21] 向喜林, 刘正, 李宗林, 等. 乳过氧化物酶系统对血型链球菌和变形链球菌生长的影响 [J]. 实用口腔医学杂志, 1998, 14 (4): 243~246

(责任编辑 王 芷)

·封面文字说明·

人类首次对天体进行深度撞击

7月4日,举世瞩目的“太空焰火”在深空绽放,美国宇航局“深度撞击”任务的撞击器以每秒10 km的速度撞到了坦普尔1彗星上。这架撞击器的质量大约有360 kg,它随着母探测器经过了172天飞行,跋涉4.3亿km才到达彗星身旁。

在撞击发生前一天,撞击器脱离了母探测器向彗星冲去。中国有报道将此称为“炮轰彗星”,但实际上,准确地说应该是“彗星追尾”。因为“深度撞击”的撞击器并不是迎面撞上彗星,而是先飞到彗星的前方,等待彗星来“追尾”。撞击器的飞行速度是每秒钟20 km,彗星的飞行速度是每秒钟30 km,彗星“追尾”的速度就是每秒钟10 km。

撞击器在撞上彗星之前,一直在利用自身携带的设备对坦普尔1彗星进行拍照,然后把照片传给母探测器,由母探测器转发回地球。最后一张照片是在撞击发生前3.7 s拍摄的。从撞击发射前的照片可以看出,撞击器在撞击前发生了明显的晃动,科学家估计这是由于撞击器受到了来自彗星的气体和尘埃的影响而造成的。

撞击器上用于向母探测器传输照片的是各向同性的信号发射器。这有点像现在的手机:从图片上你看不到天线,但它可以接收和发射信号。母探测器上有一架直径1 m的碟形天线,用于与地球联络。

当撞击器撞上彗星时,撞击产生的能量相当于4.5 t TNT爆炸所释放的能量。相比之下,今年伦敦连环恐怖爆炸袭击中的所有炸药仅相当于大约5 kg TNT当量。但即便是这样巨大的能量,对于坦普尔1彗星来说也还是微不足道。这次撞击对于坦普尔1来说仅仅是飞行中的飞机撞到了一只蚊子。撞击发生时,坦普尔1的轨道会受到影响,偏离原轨道大约10 m。但这实在算不上什么。相比之下,当坦普尔1在2024年从木星身旁飞过时,在木星强大引力的作用下,它的近

日点将偏离3 400万 km。

天文学家之所以要用撞击的方式来研究彗星,是因为彗星的内部包含着早期太阳系的秘密。彗星是太阳系中的“化石”,它们是从太阳系形成之初遗留下来的。在地球上,生物的出现永久性地改变了地球的环境,所以从地球本身已经很难发掘出原始的太阳系信息。彗星则不同,它们来自遥远的太阳系边缘,它们的物质在过去的46亿年里几乎没有发生改变。尤其是彗星内部的物质,没有受到外界的任何影响。天文学家估计,坦普尔1彗星自形成以来,受到太阳光影响的范围是表面以下1.7 km。也就是说,深于1.7 km的部分存在着最古老也是最新鲜的彗星物质。

“深度撞击”就是想要敲开彗星表面,一窥其内部的物质组成。当然,撞击器没有能力撞出一个深达1.7 km的陨坑来,但只要把彗星表面受到外界影响最大的物质撞开,科学家还是能够首次窥探到彗星内部的情况。

以前人们认为,彗星就像是“脏雪球”,一半是水冰,一半是尘土。但晚近的研究表明,彗星上没有那么多的水。彗星可能是由大约20%的水冰和80%的尘土组成的。坦普尔1彗星来自太阳系边缘一个名为“柯伊伯带”的区域,那里是彗星的仓库。

撞击发生时,撞击器在数千度的高温中化为气体,而母探测器则在不远处拍摄下这一幕。撞击激起的彗星尘埃和气体迅速向外扩展,在太空中形成了一个扇形的物质带。直到两周后才重新尘埃落定。

由于轨道的原因,母探测器在撞击发生后只能对坦普尔1进行仓促的观测。更多的工作则需要地球上的和太空中的其它探测器来完成。包括中科院上海天文台在内的全球各主要天文台都



对撞击前后的坦普尔1彗星进行了观测,太空中的雨燕号探测器、罗塞塔探测器等也进行了观测,并获得了大量数据。欧洲南方天文台对观测结果的初步分析表明,撞击激起的物质与彗星彗尾中的物质成分是一致的,数据的详细处理还需要花费数周到数月的时间。

“深度撞击”以前仅仅是科幻小说中的情节,现在已经变成了现实。这惊天一击将成为彗星探索史上一抹重彩。

本期封面图片是美国太空画家绘制的“深度撞击”艺术表现图。

(本刊记者 黄永明)