

水稻中铁的含量及其生物有效性研究进展^{*}

孟凡花, 魏幼璋

(浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310029)

[摘 要] 评述了不同米类食品 and 不同水稻籽粒及其加工产品中的铁含量、不同形态铁的生物有效性及基因技术在提高水稻铁含量和生物有效性中的研究现状, 重点介绍了高铁载体、铁贮存蛋白、铁转运蛋白、铁还原酶和肌醇六磷酸酶、半胱氨酸等的研究进展, 同时提出了该领域今后的研究方向。

[关键词] 水稻; 铁; 生物有效性; 基因技术

[中图分类号] S511.033

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)02-0073-05

WHO 数据显示^[1], 世界上有近 37 亿人口缺铁, 其中 20 亿人患有铁缺乏症。未生育妇女中有 40%, 而孕妇中有 50% 的人患有缺铁性贫血。世界上 31% 的 5 岁以下儿童有微量元素缺乏症, 其中大多数是缺铁。同时, WHO 和 FAO 数据表明^[2], 微量元素缺乏症有加剧的趋势, 人口的不断增长使耕地减少, 导致粮食作物的多样性逐年降低。在这种情况下, 水稻(*Oryza sativa*) 作为生产最可靠、效率最高、食用最方便的粮食作物, 其对耕地面积的占有率在逐年增加。同时, 水稻还是一半以上世界人口的主食, 据统计^[1,3], 稻米食品为亚洲近 30 亿人口提供了 35%~59% 的热量, 为南亚和东南亚人口分别提供了 69% 和 51% 的蛋白质。在菲律宾的一项调查^[1]中表明, 即使在高收入家庭中, 50% 人体吸收的铁来自于谷物、稻米和玉米。

自 1992 年国际水稻研究所开始着手研究土壤因素对谷物铁含量的影响以来^[1], 关于水稻铁含量的研究一直是国内外微量元素营养研究的热点之一。随着生物技术的引入, 特别是水稻基因图谱的研究取得重大突破以后, 对水稻中铁含量和生物有效性研究已经进入了分子水平, 为提高水稻铁营养提供了有效方法。本综述旨在通过对水稻铁含量和生物有效性研究进展的综合分析, 为该领域的深入研究提供参考。

1 水稻中的铁含量

水稻中的铁含量受水稻对土壤中铁的吸收、运

输和积累等因素的影响。

1.1 土壤铁含量

铁是岩石圈和土壤圈中的主要元素之一, 其含量仅次于氧、硅、铝而居第四位, 占地壳中矿质元素总含量的 5%。土壤中的铁含量变化很大, 一般为 10~200 g/kg, 平均 32 g/kg。但是铁在植物体内的含量一般只有 50 mg/kg^[4], 主要原因是土壤中的铁大多数以氢氧化物、氧化物、磷酸盐及其沉淀化合物的形态存在^[5], 可溶性铁的总量不足 10^{-10} mol/L^[6]。所以, 土壤中能被植物吸收利用的铁只有其含量的万分之一, 远不能满足植物生长的需要。

1.2 水稻铁含量

Juliano^[7]和 Pedersen 等^[8]的研究结果(表 1)表明, 水稻各部位中的铁含量以稻糠居多, 其次是稻壳、糙米和精米。而目前人们所食用的稻米主要为糙米或精米部分, 虽然稻糠作为人体营养来源越来越受到营养学家的重视^[9], 但稻糠毕竟不能成为人们生活的直接主食, 所以在开发新营养来源的同时, 应该结合人们的饮食结构, 努力提高水稻糙米和精米部分的铁含量。

吕文英^[10]的研究结果(表 2)显示, 铁在黑米中的含量远高于其他米类, 在红米中的含量次之, 在大米、糯米中的含量相近, 小米中最低。Zn, Ca, Cu, Mn 在黑米中的含量相对较高, 其次是大米和红米, 然后是糯米和小米。由此可见, 在增加黑米食用量的同时, 研究黑米吸收利用铁的生理机制及其相关的控制基因, 采用基因克隆技术和杂交育种技术, 培育高

* [收稿日期] 2003-03-07

[基金项目] 国家杰出青年基金项目(3992504)

[作者简介] 孟凡花(1980-), 女, 山东临沂人, 在读博士, 主要从事植物微量元素营养的研究。

[通讯作者] 魏幼璋(1945-), 男, 浙江余姚人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物微量元素营养的研究。

铁水稻品种, 以提高人们日常食用水稻品种的铁含量, 应当成为今后研究的攻关目标之一。

表 1 含水量 14% 的稻谷及其加工产品的维生素和矿物质含量

Table 1 The vitamin and mineral contents of paddy containing 14% of water and its processed products mg/kg

稻谷及加工品 Paddy and processed products	V _{B1}	V _{B2}	V _A	Zn	Fe
稻谷 Paddy	2.6~3.3	0.6~1.1	9.0~20.0	17~31	14~60
糙米 Brown rice	2.9~6.1	0.4~1.4	9.0~25.0	6~28	2~52
精米 Polished rice	0.2~1.1	0.2~0.6	7.5~3.0	6~23	2~28
稻糠 Rice chaff	12.0~24.0	1.8~4.3	26.0~133	43~258	86~430
稻壳 Rice husk	0.9~2.1	0.5~0.7	0	9~40	39~95

表 2 不同米类食品中 Zn, Fe, Ca, Mn, Cu 含量

Table 2 The contents of Zn, Fe, Ca, Mn and Cu in grains

米类 Grains	Zn	Fe	Ca	Mn	Cu
大米 Rice	34.9	39.4	328.6	8.8	4.1
黑米 Black rice	37.4	116.1	793.5	20.2	5.7
红米 Red rice	30.2	53.2	405.8	14.2	5.1
糯米 Glutinous rice	19.4	33.4	292.5	9.5	3.9
小米 Millet	20.3	7.4	100.5	3.0	5.8

1.3 水稻中铁含量的提高途径

要提高水稻中的铁含量, 主要是提高水稻对土壤中 Fe 的吸收、运输和积累。目前, 除了利用农艺措施, 如增加铁肥的施用^[11]外, 还可采用同位素示踪、分子标记、荧光标记等技术研究水稻和其他植物、酵母、细菌等对 Fe 的吸收、运输、积累机理和控制基因, 通过基因克隆和良种选育提高水稻的铁含量^[12, 13]。目前的研究主要集中在以下几个方面。

1.3.1 基因技术在育种中运用 不同水稻品种中的铁含量变化很大, 其性状主要受相关基因的控制。控制高铁含量的基因已经在第 7, 8, 9 染色体上得到证实, 总表现变异的 19%~30% 受这些基因的控制。通过杂交育种等技术培育出高铁含量的新品种, 对全面改善铁营养具有广阔的发展前景。中国具有丰富的种质资源, 许多水稻品种已经被鉴定为高铁含量。目前, 中国水稻研究所在这方面的主要研究工作有, 高铁含量水稻品种的筛选、多项杂交、显性基因父本不育系的轮回选择、放射性育种的组织培养、DNA 分子标记法作为选择的补充^[14]等。

1.3.2 高铁载体研究 禾本科植物缺铁时能主动分泌麦根酸类植物铁载体。麦根酸类植物载体是一种非蛋白氨基酸, 对铁具有强烈的亲和力(具有 6 个螯合铁的功能基因), 并能形成稳定的八面体三价铁的螯合物 $[\text{Fe}^{3+}\text{-MA s}]^{[15]}$ 。麦根酸类植物高铁载体的基因定位、克隆, 是根系分泌物在基因水平研究上较为成功的一个范例。研究^[16]表明, 麦根酸类植物

高铁载体的分泌受到 52 和 53 kD 两条多肽链的控制, 人们已经能检测到缺铁诱导的特异性 cDNA (Ids 1, Ids 2, ..., Ids 7), 并对克隆到的 Ids 1, Ids 2, Ids 3 进行了成功的序列分析; 日本东京大学 Mori 教授的工作小组已从缺铁胁迫的大麦中, 成功地分离并鉴定出麦根酸合成过程中的控制基因, 如尼克烟酰胺氨基转移酶基因(Naat)、尼克烟酰胺合成酶基因(Nas)、甲酸脱氢酶基因(Fdh)、腺嘌呤磷酸核糖转移酶基因(Aprt)和乙醇脱氢酶基因(Adh)^[17], Ids 和这些基因的发现, 使高铁载体生物合成的进一步研究成为可能。此外, 禾本科植物根系膜上存在的 Fe^{3+} -PS 高效吸收系统^[18], 也能促进铁的吸收。

1.3.3 铁还原酶和铁转运蛋白研究 双子叶植物和非禾本科单子叶植物在缺铁情况下, 通过激活一种特异的 H^{+} -ATPase 使土壤酸化, 从而增加铁的可溶性, 并通过一种特异的根系 Fe^{3+} 还原酶将 Fe^{3+} -螯合物还原。根系中的 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 后, Fe^{2+} 通过其转运蛋白跨越根部的细胞质膜而被转运^[15]。因此, Fe^{3+} 还原酶和铁转运蛋白在这一过程中起着重要作用。Eide 等^[19]采用功能异源互补法, 在酵母 fet 3 和 fet 4 双突变株的特异表达中, 首次克隆到双子叶植物拟南芥中的 Fe^{3+} 转运蛋白基因 RTI; Cohe 等^[20]也用酵母铁缺失的突变体, 从豌豆根中分离得到 1 个 Fe^{2+} 专一转运蛋白基因 R it 1; 伊丽莎白等^[21]成功地构建了缺铁诱导的玉米根 DNA 文库, 根的 cDNA 文库中有 Fe^{2+} -Transporter 基因;

Robinson 等^[22, 23]从拟南芥中分离克隆了 Fe^{3+} 还原酶基因(froh)和 Fe^{3+} -螯合物还原酶基因(FRO2 基因)^[23], 除此之外, 还鉴定了3个其他的FRO 基因(froh 基因家族), 认为其产物可能在不同的器官或特定的细胞类型中起作用, 从而介导铁的转运^[22]。

1.3.4 转基因水稻研究 对转基因技术提高水稻籽粒铁含量的研究已经取得了一定的进展, Takahashi 等^[24]将带有35S 启动子的Naat-A 基因导入水稻, 得到几个在石灰质土壤中能抗缺铁胁迫的水稻品系。De Vasconcelos M 等^[25]将2个携带促进铁积累(Ferritin)和铁吸收(FRO2)的基因Ptv-bar/Fer 和 Pcambia 1300/FRO2, 分别转移到印度水稻品种 CV IR 68144 未成熟的胚原始细胞中, 通过选择、鉴定, 发现转基因水稻中铁的分配和积累都得到加强。Paola Lucca 等^[26, 27]将法国豆、*Phaseolus vulgaris* 中发现的1种编码贮存铁的铁蛋白基因引入水稻籽粒, Goto 等^[28]同样将大豆铁蛋白引入水稻籽粒, 结果证明, 这些基因的引入使水稻中铁含量明显增加。

当然, 这种基因的表达并不影响植物的形态学特点、生长发育状况和繁殖能力。最近有报道表明^[29], 表达铁结合蛋白的转基因苦菜类植物, 结合相应的农艺措施后将生长得更旺盛。然而, 这种特点并没有在转基因水稻中表现出来, 可能是由于铁蛋白基因被谷蛋白启动子所限制, 从而阻碍了其在水稻籽粒胚乳中的表达。

2 水稻中铁的生物有效性

水稻中铁的生物有效性主要取决于水稻籽粒中铁的形态。

2.1 食物中的铁

食物中铁主要以非血红素铁(三价铁)和血红素铁(二价铁)两种形式存在。非血红素铁是膳食铁的主要来源, 血红素铁在膳食总铁摄入中一般只占5%~10%。血红素铁多直接被小肠粘膜上皮细胞吸收, 再与铁结合形成铁蛋白, 转运到身体其他部位而被利用, 吸收率可达25%^[30~32]。非血红素铁以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 络合物的形式存在于食物中, 与其络合的有机分子有蛋白质、氨基酸、有机酸等, 非血红素铁必须在胃酸作用下事先与有机部分分开, 并还原为血红素铁后才能被吸收, 其吸收率仅为5%, 而其低吸收率被认为是缺铁性贫血的主要原因, 特别是在发

展中国家^[33]。

2.2 植物性食品中的铁

植物性食物的铁一般吸收率很低, 多在10%以下^[34], 如大米为1%, 玉米和黑豆为3%, 莴苣为4%, 小麦为5%。其主要原因在于植物性食物中存在较多抑制铁吸收的因素, 如植酸盐、草酸盐、碳酸盐与铁形成不溶性铁盐, 而促进铁吸收的因素, 如蛋白质、氨基酸及维生素C 含量较少^[34~36]。

2.3 水稻铁生物有效性的提高途径

由于维生素C、有机酸等能够促进人体铁的吸收, 目前多利用营养保健品、食品添加剂、膳食搭配等提高水稻中铁的生物有效性。然而, 以上的方法只能治疗和预防铁的营养缺乏, 不能有效地、大范围减少缺铁性贫血在以水稻为主食的发展中国家的流行, 同时也没有解决铁营养不良的根本问题——食物性食品中铁的生物有效性低的问题。目前, 提高水稻中铁生物有效性的工作主要集中于肌醇六磷酸酶和半胱氨酸的研究。

2.3.1 肌醇六磷酸酶的研究 水稻胚乳中肌醇六磷酸能够结合95%的铁, 这部分铁不易被人体吸收, 而肌醇六磷酸酶能够通过降解肌醇六磷酸而增加水稻中铁的生物有效性, 促进人体对铁的吸收。目前, Paola Lucca 等^[26]和Louis^[27]在 *Aspergillus fumigatus* 中发现耐热的肌醇六磷酸酶, 将其控制基因引入水稻胚乳就有可能大大地提高水稻消费人口的铁营养, 因为少量的肌醇六磷酸就可强烈地抑制铁的吸收。然而这种转基因蛋白在胚乳中的表达受到限制, 为此, 目前科学家通过将白球蛋白启动子(980 bp)和其信号肽(75 bp)并合到 *A. fumigatus* 的肌醇六磷酸基因上, 以助于该基因的表达。将转有肌醇六磷酸酶基因的糯米放在胃酸条件下, 该酶蛋白能保持92%的活性, 这一研究结果说明, 这种酶耐酸性很强; 在模拟小肠环境下, 肌醇六磷酸在籽粒中的含量明显下降, 只有肌醇三磷酸能在被消化的稻米中检测到。由于只有肌醇六磷酸和肌醇五磷酸才能螯合铁并抑制铁的吸收, 所以水稻消化以后抑制铁吸收的因子减少, 这一结果说明, 转基因蛋白酶在胃肠道的适应性较强^[37]。

与谷物和大豆中的肌醇六磷酸酶相比, 从 *A. fumigatus* 中发现的酶具有耐热性和范围较大的最适pH。据报道^[38], 肌醇六磷酸酶蒸煮20 min 后, 其活性只丢失10%; 然而将该酶转移到水稻籽粒中后

其耐热性降低, 蒸煮后仅剩的活性并不能充分地降解肌醇六磷酸。所以需要进一步去发现耐热性的肌醇六磷酸酶, 以提高水稻中铁的生物有效性。

另一种提高铁生物有效性的方法就是降低籽粒中肌醇五、六磷酸, 使之达到小于 $0.5 \mu\text{mol/g}$ 的水平, 然而这样将影响水稻籽粒的发芽率^[39]。如果能够降低胚乳而保持糊粉层中肌醇六磷酸的含量, 那将有足够的磷营养为水稻种子萌发。现在科学家正在对转基因籽粒进行生化分析, 以确定肌醇六磷酸酶的引入, 是否能够减少籽粒中肌醇六磷酸的含量, 而不影响种子的发芽率。

2.3.2 半胱氨酸研究 半胱氨酸和肉类中的半胱氨酸结合肽, 能够通过其硫醇基与铁结合, 促进人体对非血红素铁的吸收。当将 210 mg 的半胱氨酸或相当数量的半胱氨酸加入玉米粉后, 铁的吸收增加了 2 倍。据报道^[40], 每个金属硫因蛋白分子中含有 12 种半胱氨酸。Paola Lucca 等^[26]从 basmati 水稻中发现 1 种能促进金属硫因蛋白形成的基因, 并得到基因高度表达的转基因植株。试验显示, 可溶性籽粒蛋白中的半胱氨酸残基含量增加了 7 倍, 半胱氨

酸残基增加会促进半胱氨酸含量的增加, 从而也就提高了水稻中铁的生物有效性。

3 展 望

通过以上的综合评述, 今后对提高水稻中铁含量的研究工作应集中在以下几个方面: 抗缺铁黄化基因型种或品种的筛选; 与缺铁有关的关键基因——转录因子基因的筛选和克隆, 并研究其的启动子区; 寻找 *Fro 2*, *Naat* 和 *Nas* 等基因的启动子区; 鉴定 Fe^{3+} -*Mas* 特异的质膜 *Transporter* 基因; 转基因水稻中铁的吸收、运输、分配机理的研究等^[25]; 在水稻铁生物有效性方面的研究应集中在: 进一步发现耐热性的肌醇六磷酸酶; 促进肌醇六磷酸酶基因在水稻籽粒中的表达; 金属硫因蛋白基因的进一步研究; 与医学相结合, 研究人体吸收、消化铁特别是非血红素铁的机制, 以求发现新的研究突破点。随着研究工作的深入开展, 最终必将能提高水稻籽粒中铁的含量和生物有效性, 以利于人体的吸收利用, 从而改变目前铁缺乏的现状, 并为其他缺乏元素的研究工作提供借鉴。

[参考文献]

- [1] Gregorio G B, Senadhira D, Htut T, et al. Improving iron and zinc value of rice for human nutrition[J]. Agriculture et Development, 1999, 23(9): 77- 81.
- [2] Welch R M, Graham R D. A new paradigm for world agriculture: meeting human need[J]. Productive, Sustainable, Nutrition, Field Crops Res, 1999, 60: 1- 10.
- [3] Juliano B O. 水稻与人类营养[M]. 谷承, 译. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
- [4] Graham R D, Welch R M. Plant food micronutrient composition and human nutrition[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2000, 31: 1627- 1640.
- [5] Michael A G, Pearson J N, Marentes E. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops[J]. Field Crops Research, 1999, 60: 41- 56.
- [6] Guerinot M L, Yi Y I. Iron: noxious, noxious, and not readily available[J]. Plant Physiol, 1994, 104: 815- 820.
- [7] Juliano B O. A factors affecting nutritional properties protein[J]. Frans Natl Acad Sci Technol(philipp), 1985, 7: 205- 216.
- [8] Pedersen B, Eggum B O. The influence of milling on the nutritive value of flour from cereal grains in rice plant[J]. Plant Foods Hum Nutr, 1983, 33: 267- 278.
- [9] Senyramis M A, Domenea, Hilda R, et al. Genetic analysis of rice grain quality dietary zinc improves and calcium depresses growth and zinc uptake in rats fed rice bran[J]. Nutrition Research, 2001, 21: 1493- 1500.
- [10] 吕文英. 米类食品中锌、铁、钙、锰、铜等元素含量测定与研究[J]. 微量元素与健康研究, 2000, 17(4): 46- 47.
- [11] 鲁如坤. 土壤- 植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997. 277.
- [12] Kilcoyne S H, Bentley P M, Thongbai P, et al. The application of ^{57}Fe ssbauer spectroscopy in the investigation of iron uptake and translocation in plants Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 160(1): 157- 166.
- [13] 明 凤, 米国华, 张福锁, 等. 植物营养性状有关基因的分子标记及定位[J]. 生物工程进展, 1999, 19(6): 16- 22.
- [14] Cheng Shi-hua, Hu Pei-song, Tong Sheng-xiang. Development of rice varieties with higher iron content in china China National Rice Reserch Institute[Z]. Beijing: International Rice Research Institute International Rice Congress, 2002.
- [15] 曹 慧, 韩振海, 许雪峰, 等. 高等植物的铁营养植物[J]. 生理学通讯, 2002, 38(2): 180- 186.
- [16] Okumura N, Nishizawa N K, Umehara Y, et al. A diacylglycerol (Lds 2) expressed under iron deficiency condition in the roots of *Hordeum vulgare*[J]. Plant Mol Biol, 1994, 25: 705- 719.

- [17] Mori S. Reevaluation of the genes induced by iron deficient in barley roots[A]. Ando T, Mori S. Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment[C]. Netherlands Kluwer: The Netherlands Kluwer Academic Publishers, 1997. 249- 254
- [18] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 200- 275
- [19] Eide D, Fett J, Guerinot M L. A novel iron-regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 5624- 5624
- [20] Cohe C K, Fox T C, Carrin D F, et al. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants[J]. Plant Physiol, 1998, 116: 1063- 1072
- [21] 印丽萍, 祁晓廷, 刘祥林, 等. 缺铁诱导玉米根cDNA文库的构建及铁胁迫基因(fdrs)的筛选和鉴定[J]. 科学通报, 2000, 45: 44- 48
- [22] Robinson N J, Sadijuda T, Groom Q J. The froh gene family from *Arabidopsis thaliana*: putative iron-chelate reductase[J]. Plant Soil, 1997, 196: 245- 248
- [23] Robinson N J, Procter C M, Conolly E L, et al. A ferrichelate reductase for iron uptake from soil[J]. Nature, 1999, 397: 694- 697
- [24] Takahashi M, Purification Characterization and DNA sequencing of nicotianamine aminotransferase (NAAT III) [A]. Ando T, Mori S, eds. Expressed in Fe deficient rice roots. Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment[C]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997. 279- 283
- [25] De Vasconcelos M, Datta K, Oliveira N, et al. Enhanced iron accumulation and absorption in rice: a binary approach to improve iron[Z]. Beijing: International Rice Research Institute International Rice Congress, 2002
- [26] Paola Lucca, Richard Hurrell, Ingo Potrykus. Approaches to improving the bioavailability and level of iron in rice seeds[J]. Journal of Science of Food and Agriculture, 2001, 81: 828- 834
- [27] Louis S T. New Genes Boost Rice Nutrients[J]. Science, 1999, 285(13): 994
- [28] Goto F, Yoshihara T, Shigemoto N, et al. Iron fortification of rice seed by the soybean ferritin gene[J]. Biotechnol, 1999, 17: 282- 286
- [29] Goto F, Yoshihara T, Saiki H, Theor. Iron accumulation and enhanced growth in transgenic lettuce plants expressing the iron-binding protein ferritin[J]. Appl Genet, 2000, 100: 658- 664
- [30] Krause M V, Mahan L K. Food nutrition and diet therapy[M]. 8th edition. Philadelphia PA: W B Saunders Company, 1992. 118
- [31] Welch R M, Graham R D. Breeding crops for enhanced micronutrient content[J]. Plant and Soil, 2002, 245(1): 205- 214
- [32] Zhang Peiqun, Qian Qinfang, Feng Weiyue, et al. The influence of fat, vitamin, zinc and calcium on iron availability from plant food with *in vitro* method[J]. Nucleic Acids Res, 1996, 19(1): 50- 53
- [33] Taylor P G, Mendez, Castellanos H, et al. Iron bioavailability from diets consumed by different socioeconomic strata of the Venezuelan population[J]. J Nutr, 1995, 125: 1860- 1868
- [34] 刘志成, 于守祥. 营养与食品卫生学[M]. 第2版. 北京: 人民卫生出版社, 1996. 33- 38
- [35] 林君英, 计时华. 食物中游离态二价铁及游离态三价铁的测定[J]. 广东微量元素科学, 1996, 3(8): 29- 33
- [36] Gowria B S, Kalpana Platelb, Jamuna Prakasha, et al. Influence of amla fruits (*Emblica officinalis*) on the bioavailability of iron from staple cereals and pulses[J]. Nutrition Research, 2001, 21: 1483- 1492
- [37] Lucca P, Hurrell R, Potrykus I. Genetic engineering approaches to improve the bioavailability and the level of iron in rice grains[J]. Theor Appl Genet, 2001, 102: 392- 397
- [38] Pasamontes L, Haiker M, Wyss M, et al. Gene cloning, purification, and characterization of a heatstable phytase from the fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63: 1696- 1700
- [39] Sandberg A S, Svanberg U. Hydrolysis by phytase in cereals; effects on *in vitro* estimation of iron availability[J]. J Food Sci, 1991, 56: 1330- 1333
- [40] Hsieh H M, Liu W K, Huang P C. A novel stress-inducible metallothionein-like gene from rice[J]. Plant Mol Biol, 1995, 28: 381- 389

Progress of Iron content and bioavailability of rice

MENG Fan-hua, WEI You-zhang

(College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China)

Abstract: Iron content of some grain, rice seed and its processed products, bioavailability of iron of various forms are reviewed. Meanwhile application of gene-technology to improve the iron content and bioavailability of rice are summarized and discussed, at this aspect the most attention are attached to phyto-siderophores, ferritin, Fe-transporters, Fe³⁺-chelate reductase, phytase, cysteine. At last, the research perspective in this field is also discussed.

Key words: rice; iron; bioavailability; gene-technology