

傅里叶红外光谱法研究肌肉蛋白质的二级结构*

张秋会, 黄现青, 李苗云, 柳艳霞, 张建威, 高晓平, 孙灵霞, 赵改名

(河南农业大学 食品科学技术学院, 河南 郑州, 450002)

摘 要 蛋白质是最重要的生物大分子, 它的二级结构决定了其功能特性。傅里叶红外光谱法 (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 以其独特的优越性, 在研究蛋白质二级结构中发挥着不可替代的作用。文中就 FTIR 测定蛋白质二级结构的方法进行了综述。

关键词 蛋白质; 二级结构; FTIR

蛋白质是最重要的生物大分子之一。肌肉总质量的 15% ~ 22% 为蛋白质, 肉制品的质构、感官品质、切片性、保水性、乳化稳定性和产品得率等品质特性由肌肉蛋白质的功能特性来决定^[1-3]。而蛋白质的构象很大程度上决定了其功能特性。在正常情况下, 蛋白质以紧密折叠结构存在, 当受到外界条件影响 (包括盐类^[4-5]、pH 值^[6]、离子强度^[7-9]、非肉添加物质^[10-13]、制备条件^[14-16]、加工条件等^[17]) 时, 其生物活性即功能特性发生改变, 即蛋白质变性, 二级结构发生变化, 但一级结构保持完好。

蛋白质二级结构是指多肽链骨架的局部空间结构, 常见的二级结构有 α -螺旋、 β -折叠等规则结构, 转角、环形等半规则和卷曲无规则结构等^[18]。各类二级结构主要是由氢键所维系, 其他作用力如范德华力, 配位键, 二硫键等也有一定的贡献^[19]。检测蛋白质二级结构的方法有很多, 常用的有核磁共振 (NMR)^[20]、光谱法有圆二色谱法 (CD)^[21-22]、紫外^[23]和荧光光谱法^[24]、X 射线衍射法 (X-ray)^[25] 和 FTIR^[26] 等。但是, 这些方法有其局限性。X 射线衍射不能检测生理条件对蛋白质二级结构的影响; NMR 用于分子质量相对较小的蛋白质的结构^[20]; CD 只用于浓度较低澄清的蛋白质溶液的测定; 荧光和紫外光谱仅限于带有发色集团的蛋白质 (如 Trp, Tyr 等) 的结构分析^[21]。但对于 FTIR 不受官能团、蛋白质状态、分子质量、浓度、环境等条件的限制。此外, FTIR 测定蛋白质二级结构, 使用样品量较少, 不受光散射和荧光的影响, 也能够实现动力学性质的研

究^[27]。同时, FTIR 具有操作简便、波长精度高、分辨率好、扫描速度快、灵敏度高等优点, 被广泛地应用于生产和科研的各个领域^[28]。

蛋白质的二级结构特性与其分子内的氢键密切相关, FTIR 技术为研究蛋白质结构与功能间关系提供了有强有力手段^[29-31]。本文就利用 FTIR 测定蛋白质二级结构的方法研究进行了综述。

1 FTIR 的发展

FTIR 用于蛋白质二级结构的分析, 经历了定性阶段、半定量阶段和定量阶段的发展过程。在 20 世纪 50 年代, Elliott 等提出了 1 660 ~ 16 500 cm^{-1} 的峰为 α -螺旋结构, 1 640 ~ 1 630 cm^{-1} 的峰为 β -折叠结构的假说^[18,27]; 后来, 很多半定量计算蛋白质二级结构的方法随即出现; 到了 20 世纪 80 年代, Surew 等将二阶导数理论和将卷积方法应用于蛋白质二级结构分析, 使得 FTIR 研究蛋白质二级结构进入定量化阶段^[18]。

一般情况下, 位于 1 700 ~ 1 500 cm^{-1} 的酰胺带是蛋白质的 IR 光谱的 3 大类谱带之一。其中, 位于 1 700 ~ 1 600 cm^{-1} 的峰为酰胺 I 带 (amide I), 位于 1 600 ~ 1 500 cm^{-1} 处的峰为酰胺 II 带 (amide II)^[32]。随着科学技术的发展和进步, 1 330 ~ 1 220 cm^{-1} 的酰胺 III 带也被用于归属蛋白质的二级结构并探讨其内部氢键结合情况^[33]。其中, 酰胺 I 带对于蛋白质二级结构的研究最有价值。通常情况下, 1 600 ~ 1 639 cm^{-1} 被指认为 β -折叠; 1 640 ~ 1 650 cm^{-1} 被指认为无规则卷曲 (C=O 与水形成氢键); 1 651 ~ 1 660 cm^{-1} 被指认为 α -螺旋结构; 1 661 ~ 1 700 cm^{-1} 被指认为 β -转角结构^[18,27,32]。谢孟峡等利用甲醇作为变性剂处理了牛血清蛋白 (BSA)、核糖

第一作者: 博士, 讲师 (赵改名教授为通讯作者, E-mail: gmzhao@126.com)。

* 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (14B550018)

收稿日期: 2015-04-28, 改回日期: 2015-05-11

核酸酶 A (Rnase A) 和伴刀豆球蛋白 A (Concanavalin A), 利用 FTIR 测量了 $1\ 600 \sim 1\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 内酰胺 I 谱带和 $1\ 330 \sim 1\ 220\ \text{cm}^{-1}$ 的酰胺 III 带, 并将 FTIR 测定结果和 X 射线衍射数据进行了比较, 结果认为 3 种结果吻合良好, 酰胺 III 带谱峰归属是合理的, 即 $1\ 330 \sim 1\ 290\ \text{cm}^{-1}$ 为 α -螺旋; $1\ 295 \sim 1\ 265\ \text{cm}^{-1}$ 为 β -转角; $1\ 270 \sim 1\ 245\ \text{cm}^{-1}$ 为无规卷曲; $1\ 250 \sim 1\ 220\ \text{cm}^{-1}$ 为 β -折叠^[33]。

FTIR 的再造性很强, 在不同变性条件下, 可通过 FTIR 谱观测到蛋白质结构中的微小变化, 并可将这些变化归属为不同变性条件引起的二级结构的改变。FTIR 有其独特的优越性: 高的分辨率, 高的灵敏度, 高的信噪比, 准确的频率精度。这些特点使得去卷积 (deconvolution)、二阶导数谱 (second derivative spectrum)、曲线拟合 (curve-fitting)、因数分析法 factor analysis (FA)、奇值分解法 singular value decomposition (SVD)、偏最小二乘法 partial least squares method (PLS)^[34] 等数学处理方法和应用可以用于 FTIR 上, 因而可以把原来蛋白质 FTIR 光谱中未能分辨的峰进一步分解为多个子峰, 并指出各个子峰的峰位, 通过曲线拟合的方法, 可以定量的分析蛋白质中各二级结构的含量。

2 FTIR 在蛋白质二级结构测定中的应用

蛋白质的变性受到很多因素的影响, 如温度、化学试剂、超高压等处理条件和环境。通过对蛋白质酰胺吸收带的去卷积、二阶导数和拟合分析, 即可观察到蛋白质变性过程中二级结构的变化。

2.1 热变性对蛋白质二级结构的影响

热变性是蛋白质变性中最常见的一种, 很多蛋白质, 如大豆蛋白、肌肉蛋白、花粉蛋白、鱼鳞蛋白等在热处理过程中, 蛋白质构象都发生很大变化, 最终影响蛋白质的生理功能特性。

南京农业大学曹莹莹等人参照 Nauss^[35] 及林丽军^[36] 等方法, 提取肌球蛋白, 再把肌球蛋白进行超高压处理并加热制备为凝胶, 进行冷冻干燥, 用 FTIR 主要测量了 $1\ 600 \sim 1\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 内酰胺 I 谱带, 再采用 Origin 8.5 软件分析, 经二阶求导, 然后用 Gaussian 曲线去卷积进行多峰拟合, 根据峰面积计算各二级结构的比率。结果认为肌球蛋白的二级结构和凝胶的功能特性之间有显著相关性, 二级结构之间的转换, 直接并显著影响了凝胶的微观结构, 改变了凝胶的保水性以及质构特性^[37-38]。

卞为东等^[39] 利用 FTIR 研究了加热过程中天花粉蛋白的二级结构的变化过程, 结果认为在 $25 \sim 55^\circ\text{C}$ 内, 蛋白质各二级结构比例基本不变; $55 \sim 60^\circ\text{C}$ 时, 所有二级结构含量都显著改变; 65°C 以上时, β -折叠结构含量达到 56%, 之后没有变化。袁波等^[40] 研究了梯度升温过程中牛血清白蛋白 (BSA) 的构象的变化, 认为 70°C 以下, α -螺旋是 BSA 的主要结构; 70°C 以上 α -螺旋结构减少, β -折叠结构增加, 同时高温下 BSA 形成了无规卷曲结构。钟朝辉等^[41] 研究了鱼鳞胶原蛋白在加热过程中 FTIR 光谱特征, 认为在 60°C 时, 酰胺 I 带有明显改变, α -螺旋结构减少, 出现无规卷曲结构, β -折叠结构增加, 表明高温使维系胶原蛋白螺旋结构的氢键被破坏, 螺旋结构向无规卷曲、 β -转角和 β -折叠等其他结构转变。

Paolorossi 等^[42] 研究了人类 β^2 糖蛋白 I 和脂质复合体在加热过程中结构变化, 认为在 $10 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度内, 脂质-蛋白质复合物形成大的聚集体。在溶液中, 当蛋白质和脂质结合形成阴性膜或阳性膜时, α -螺旋结构和 β -折叠结构有较大差异。Sassi 等^[43] 研究了溶菌酶在 $22 \sim 92^\circ\text{C}$ 温度内不同的蛋白质浓度下的 FTIR 吸收光谱, 并对酰胺 I 带峰进行分析, 详细描述了二级结构的重排过程和信息, 认为蛋白质与蛋白质间的相互作用形成的聚合物的稳定性和聚合程度依赖于溶剂的组成成分。

2.2 化学变性蛋白质二级结构的影响

蛋白质与任何化学物质之间均存在相互作用, 尤其是水、一些盐类离子和有机溶剂常常很易引起蛋白质结构的变化, 甚至是变性最终影响蛋白质的功能特性。在肉制品加工过程中常常添加一些盐类, 如食盐、钙盐和镁盐等, 通过影响肌肉蛋白质的构象来改变肌肉蛋白质的功能特性, 最终改善肉制品的品质。

Heaton 利用 FTIR 结合热量示差扫描等方法研究了 Ca^{2+} 和甘油磷酸胆碱和 C-反应蛋白相互作用。认为不像甘油磷酸胆碱, Ca^{2+} 的存在对光谱的影响不大, 而且钙和 C-反应蛋白的相互作用方式, 没有改变在多肽骨架上的氢键。还认为, C-反应蛋白和磷酸胆碱表面之间存在的特异性相互作用, 并可能引起蛋白质的变性。而且 Ca^{2+} 存在下, 加热到 70°C 也没有产生 β -折叠结构。他们的存在升高了 C-反应蛋白的变性温度, 增强了蛋白质的热稳定性^[44]。

红枫等人^[45-46] 利用 FTIR 技术研究了稀土离子对不同条件下生理蛋白质结构的影响, 认为肽链中含氧或氮的基团与稀土离子结合, 改变了蛋白质结构中

的氢键,使蛋白质二级结构发生变化。蛋白质含有多配位基团,能够和各种离子发生某些作用,从而影响或改变蛋白分子固有的结构和功能。

Haris 运用 FT-IR,对一种人工合成的 S_4 多肽进行了构象分析,结果表明,在不同的溶剂中肽类的构象不同。在 2% H_2O 的三氟乙醇中,主要以 α -螺旋结构存在;在水溶液中,主要以随机卷曲结构存在^[47]。

张极震等^[48-50]利用 FTIR 研究了水对肌红蛋白和聚赖氨酸溴化氢结合物二级结构的影响,认为提高水合度,就减少了蛋白质无序结构含量,增加了有序二级结构含量。还利用 FT-IR 研究水在稳定多肽构象中的作用。证实了水能够促进肽链的柔性、运动性。

杨红等^[51]利用 FTIR 研究了有机溶剂对脂肪酶构象的影响,认为各种溶剂均能引起酶的二级结构变化。酶的功能和特性与其结构密切相关,通过研究不同溶剂对酶构象的影响,能够更好地认识水在维持蛋白质空间构象中的重要作用。

铅是最具危害性的重金属元素之一。张丽等^[52]利用 FTIR 研究了 Pb^{2+} 对牛血清白蛋白二级结构的影响,认为随着 Pb^{2+} 浓度的增大,蛋白质结构中 α -螺旋结构和 β -折叠结构均减少,无规卷曲基本保持不变, β -转角含量有所增强。

2.3 超高压等物理方法对蛋白质二级结构的影响

在生命、医药、食品等领域常常采用物理方法对一些物料进行处理,使物料在一定的温度和适当条件下存在适当的时间,引起物料成分、非共价键(氢键、离子键和疏水键等)的破坏或形成,使物料中的蛋白质等生物高分子构象发生变化,可能使蛋白质发生变性,从而达到物料处理的目的。这些方法主要有静电场、超高压^[53]、超声波等^[54-55]。

Magazu 等^[56]研究了暴露于静磁场中的牛血清白蛋白的 FTIR 光谱,结果认为低强度的电磁场能影响 $C=O$ 和 $C-N$ 伸缩振动和肽键的 $N-H$ 平面弯曲。另外,在海藻糖水溶液的牛血清白蛋白中红外光谱没有显著的变化,可能是海藻糖对电磁场中蛋白质具有生物保护效力。沈子威等^[57]利用 FTIR 研究了强声波对植物壁蛋白质二级结构的影响,认为强声波对植物细胞效应较大,酰胺 I 带和 II 带的二级结构情况均有所变化。唐传核等^[58]利用 FTIR 研究了超高压对大豆分离蛋白构象的影响,认为超高压处理显著影响了大豆分离蛋白的酰胺 I 带的峰,同时认为超高压处理过程中蛋白质二级结构经历了“重构过程”。刘斌

等^[59]研究了超声对 BSA 二级结构的影响,认为超声处理使得 α -螺旋结构和无规卷曲结构向 β -折叠和 β -转角结构转化,而且超声处理促使 BSA 二级结构的变化主要发生在处理 10 min 时间内。曹莹莹^[37]、Cao^[38]、Chen^[60]等人利用超高压处理了肌球蛋白凝胶,认为高压处理对凝胶的品质特性有显著影响。这可能和肌球蛋白二姐结构的变化有直接关系。

3 展望

直到今天,FTIR 已经得到了很广泛的应用,这和 FTIR 的独特性和优越性是分不开的。利用 FTIR 能够高效、便捷地反映蛋白质的二级结构的变化情况,为蛋白质的变性过程以及蛋白质分子间相互作用研究提供了便利手段。在肉制品加工和品质控制基础理论研究过程中,若能够利用 FTIR 测定肌肉蛋白质的二级结构变化情况,再结合肌肉蛋白质凝胶品质的变化规律,完全可以构建肌肉蛋白质二级结构和凝胶品质间的关系,能够实现光谱法快速预测肌肉蛋白质凝胶的品质,为肉制品开发和品质控制奠定基础,促进肉品工业的发展。但是蛋白质的二级结构很复杂,且进行光谱测定时的影响因素较多,而且在酰胺 I 带和 III 带子峰的准确归属上还存在着一定的争议,也许二者结合起来进行子峰的归属或者结合其他的分析方法能够对二级结构进行更精确的定量分析。

参 考 文 献

- [1] 周光宏,徐幸莲. 肉品学[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999:221-262.
- [2] XIONG Y L, Brekke C J. Changes in protein solubility and gelation properties of chicken myosin fibrils during storage[J]. Food Science 1989, 54(5): 1141-1146.
- [3] Camou, J P, Sebrane, J G, Olson, D G. Effect of heating rate and protein concentration on gel strength and water loss of muscle protein gels[J]. J. Food Sci, 1989, 54(4):850-854.
- [4] 李苗云,张秋会,柳艳霞,等. 不同磷酸盐对肉品保水性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(4): 439-442.
- [5] 李苗云,赵改名,张秋会,等. 复合磷酸盐对肉制品加工中的保水性优化研究[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 80-85.
- [6] Westphalen A D, Briggs J L, Lonergan S M. Influence of pH on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat induced gelation[J]. Meat Science. 2005, 70(2):293-299.
- [7] Egelandsdal B, Fretheim K, Samejima K. Dynamic rheo-

- logical measurements on heat-induced myosin gels: Effect of ionic strength, protein concentration and addition of adenosine triphosphate or pyrophosphate[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1986, 37(9):915-926.
- [8] Bertram H C, Kristensen M, Andersen H J. Functionality of myofibrillar proteins as affected by pH, ionic strength and heat treatment - a low-field NMR study[J]. *Meat Science*, 2004, 68(2): 249-256.
- [9] 徐幸莲, 周光宏, 黄鸿兵, 等. 蛋白质浓度、pH 值、离子强度对兔骨骼肌肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2004, 20(3): 159-163.
- [10] CHIN K B, GO M Y, XIONG Y L. Konjac flour improved textural and water retention properties of transglutaminase-mediated, heat-induced porcine myofibrillar protein gel: effect of salt level and transglutaminase incubation[J]. *Meat Science*, 2009, 81:565-572.
- [11] 赵改名, 孙灵霞, 柳艳霞, 等. 木薯变性淀粉和蔗糖酯对冷却肉保水效果的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(16): 286-289.
- [12] 赵改名, 祝超智, 柳艳霞, 等. 壳聚糖对肌肉保水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(9): 78-80.
- [13] 柳艳霞, 赵改名, 高晓平, 等. 大豆分离蛋白和变性淀粉对猪肉糜保水性的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(4): 48-51.
- [14] 刘冠勇, 罗欣. 影响肉与肉制品系水力因素之探讨[J]. *肉类研究*, 2000, 14(3): 16-18.
- [15] 高晓平, 柳艳霞, 赵改名, 等. 屠宰因素对肌肉保水性影响的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2007, 23(2): 98-100.
- [16] Jeremiah L E, Aalhus J L, Robertson W M, et al. The effects of grade, gender and postmortem treatment on beef. II. Cooking properties and palatability attributes[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 1996, 77(1): 41-54.
- [17] 缪松, 包建强, 冯志哲, 等. 不同冻结速度对猪肉、青鱼肌肉咀嚼性和持水能力的影响[J]. *制冷*, 2000, 19(1): 18-24.
- [18] 何建川, 邵阳, 张波. 蛋白质和变性蛋白质二级结构的 FTIR 分析进展[J]. *化学研究与应用*, 2012, 24(8): 1176-1180.
- [19] 刘媛. 红外对蛋白质二级结构的指认[D]. 北京: 北京师范大学, 2002.
- [20] 吴谨光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 192.
- [21] LIU R, ZHAO S M, XIONG S B, et al. Role of secondary structure in the gelation of porcine myosin at different pH values[J]. *Meat Science*, 2008, 80:632-639.
- [22] 沈星灿, 梁宏, 何锡文, 等. 圆二色光谱分析蛋白质构象的方法及研究进展[J]. *分析化学*, 2004, 32(3): 388-394.
- [23] 曹书霞, 赵玉芬. 分子吸收光谱在生物大分子研究中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(10): 1197-1201.
- [24] 陈葵葵, 张宁, 张文申. 蛋白质分子荧光探针研究及其应用新进展[J]. *分析化学*, 2006, 34(9): 1341-1347.
- [25] 高红艳, 许强, 杨志怀. FT-IR 在研究蛋白质二级结构中的应用[J]. *宝鸡文理学院学报: 自然科学版*, 2009, 29(3): 47-53.
- [26] Yin Y, Berglund L, Salmén L. Effect of steam treatment on the properties of wood cell walls[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(1): 194-202.
- [27] 卢雁, 张玮玮, 王公轲. FTIR 用于变性蛋白质二级结构的研究进展[J]. *光谱学光谱分析*, 2008, 28(1): 88-93.
- [28] 杨姣兰, 陈冬青. 红外光谱分析技术在环境污染与生命科学领域的具体应用[J]. *中华预防医学杂志*, 2002, 36(4): 280-282.
- [29] 周瑞明. 蛋白质二级结构的红外光谱[J]. *华东理工大学学报*, 1997, 23(4): 422-425.
- [30] 刘明. FTIR 对丝素蛋白构象的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [31] 童义平, 李伟, 林燕文. 傅里叶红外光谱研究血清白蛋白构象[J]. *光谱学与光谱分析*, 1999, 19(5): 704-706.
- [32] 邢本刚, 梁宏. FT-IR 在蛋白质二级结构研究中的应用进展[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 1997, 15(3): 45-49.
- [33] 谢孟峡, 刘媛. 红外光谱酰胺Ⅲ带用于蛋白质二级结构的测定研究[J]. *高等学校化学学报*, 2003, 24(2): 226-231.
- [34] Mahesen M J, Bjerregaard S, Hovgaard L, et al. Multivariate analysis of phenol in freeze-dried and spray-dried insulin formulations by NIR and IR[J]. *AAPS Pharm Sci Tech*, 2011, 12(2): 627-636.
- [35] Nauss K M, Kitagawa S, Gergely J. Pyrophosphate binding to and adenosine triphosphatase activity of myosin and its proteolytic fragments[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1969, 244(3): 755-765.
- [36] 林丽军. 肌球蛋白的 ATPase 活性及热凝胶特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [37] 曹莹莹, 张亮, 王鹏, 等. 超高压结合热处理对肌球蛋白凝胶特性及蛋白二级结构的影响[J]. *肉类研究*, 2013, 27(1): 1-7.
- [38] CAO Ying-ying, XU Xing-lian, ZHOU Guang-hong, et al. The mechanism of high pressure-induced gels of rabbit myosin[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 16: 41-46.
- [39] 卞为东, 孙素琴, 黄岳顺, 等. FTIR 光谱法研究天花粉蛋白的热去折叠过程[J]. *光谱学与光谱分析*,

- 2000, 20(4):471-473.
- [40] 袁波, 严惠民. 利用红外光谱和窗口因子分析研究加热导致的牛血清白蛋白的二级结构变化[J]. 高等学校化学学报, 2007, 28(12):2 255-2 258.
- [41] 钟朝辉, 李春美, 顾海峰, 等. 温度对鱼鳞胶原蛋白二级结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(10):1 970-1 976.
- [42] Paolorossi M, Montich G G. Conformational changes of β 2- human glycoprotein I and lipid order in lipid-protein complexes[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2011, 1 808(9): 2 167-2 177.
- [43] Sassi P, Giugliarelli A, Paolantoni M, et al. Unfolding and aggregation of lysozyme: a thermodynamic and kinetic study by FTIR spectroscopy[J]. *Biophy Chem*, 2011, 158(1):46-53.
- [44] Heaton R J, Raynesb J C, Johnstone D S. A study of the denaturation of human C-reactive protein in the presence of calcium ions and glycerophosphorylcholine[J]. *Thermochimica Acta*, 1999, 334:97-106.
- [45] 红枫, 王菱, 李荣昌. 稀土离子对 BEL7402 细胞蛋白质构象变化的影响[J]. 首都医科大学学报, 2003, 24(3):225-227.
- [46] 张晓春, 李邨, 陆天虹, 等. 镧离子对植物体内过氧化物酶活性的影响[J]. 无机化学学报, 2003, 19(12): 1 285-1 289.
- [47] Haris P I. The conformational analysis of a synthetic S4 peptide corresponding to a voltage-gated potassium ion channel protein[J]. *FEBS Letters*, 1994, 349:371-374.
- [48] 张极震, 梁圻. 水在稳定肌红蛋白天然结构中的作用[J]. 生物物理学报, 1995(1):5-10.
- [49] 张极震, 梁圻, 杨景文, 等. 傅立叶变换红外光谱法研究水在稳定多肽构象中的作用[J]. 生物物理学报, 1994, 10(2):219-224.
- [50] 张极震, 梁圻, 叶文, 等. FTIR 法定量研究水对聚赖氨酸溴化氢结合物二级结构的影响[J]. 生物物理学报, 1996, 12(2):195-199.
- [51] 杨红, 高修功, 曹淑桂, 等. 用傅立叶变换红外光谱研究有机溶剂对脂肪酶构象的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 1997, 16(2):42-46.
- [52] 张丽, 秦德志, 杨维春, 等. Pb^{2+} -牛血清白蛋白复合体系中蛋白质二级结构的研究[J]. 分析测试学报, 2010, 29(7):721-725.
- [53] MA Fei, CHEN Cong-gui, ZHENG Lei, et al. Effect of high pressure processing on the gel properties of salt-soluble meat protein containing $CaCl_2$ and κ -carrageenan[J]. *Meat Science*, 2013, 95:22-26.
- [54] LI Xu, XU Yuan, HE Bin. Magnetoacoustic tomography with magnetic induction for imaging electrical impedance of biological tissue[J]. *Appl Phys*, 2006, 99(6):66 112-66 114.
- [55] XIA Rongmin, LI Xu, HE Bin. Magnetoacoustic tomographic imaging of electrical impedance with magnetic induction[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(8):83 903.
- [56] Magazu S, Calabro E. Studying the electromagnetic-induced changes of the secondary structure of bovine serum albumin and the bioprotective effectiveness of trehalose by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *J Phys Chem B*, 2011, 115(21):6 818-6 826.
- [57] 沈子威, 孙克利, 杨钧, 等. 应用傅里叶红外光谱研究强声波作用下植物壁蛋白质二级结构变化[J]. 光子学报, 1999, 28(7):600-602.
- [58] 唐传核, 马正勇. 采用 FTIR 技术研究高压处理对冻干大豆分离蛋白构象的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5):1 237-1 240.
- [59] 刘斌, 马海乐, 李树君, 等. 应用 FTIR 研究超声对牛血清白蛋白二级结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8):2072-2076.
- [60] CHEN Xing, CHEN Cong-gui, ZHOU Yan-zi, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containing κ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40:262-272.

Study on secondary structure of meat protein by FTIR

ZHANG Qiu-hui, HUANG Xian-qing, LI Miao-yun, LIU Yan-xia, ZHANG Jian-wei,
GAO Xiao-ping, SUN Ling-xia, ZHAO Gai-ming

(College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT Protein is an important macromolecules, the secondary structure directly determines its properties. FT-IR plays an irreplaceable role with its unique advantages in studying the protein secondary structure. In this paper, the determination method of protein secondary structure by FTIR is described.

Key words protein; secondary structure; FTIR