

# 苹果在储藏过程中物理特性的变化

莫润阳,王公正,刘丽丽

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院应用声学所,陕西 西安 710062)

**[摘要]** 为了建立苹果声学参量与品质参量间的关系,对在不同温度和时间条件下贮藏的红富士苹果表面超声波反射回波信号和声波穿透苹果所需时间及穿透苹果后透声信号幅度的变化进行了测定,探讨了储藏温度、储藏时间等环境因素对苹果储藏过程中外观、质量,尤其是声速、声衰减等声学参量的影响。结果表明:当储藏温度一定时,随着储藏时间的增加,苹果质量减少,苹果表面反射回波幅度减小,超声衰减系数降低,声速下降;当储藏时间相同而温度不同时,随储藏温度的升高,反射回波幅度减小,且温度越高,减小愈快,超声衰减系数降低也越快;苹果质量变化有相似规律。苹果采后储藏前期后成熟速度较慢,而储藏后期后成熟速度较快。苹果在储藏过程中物理特性的变化与其声学参数的变化有一定对应关系,该结果预示可利用储藏期内超声参数的变化对苹果品质进行评价。

**[关键词]** 红富士苹果;储藏温度;储藏时间;物理特性;超声无损检测

**[中图分类号]** S661.1;S609+.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2007)10-0049-06

## Quality evaluation of the apple based on physics character

MO Run-yang, WANG Gong-zheng, LIU Li-li

(Applied Acoustic Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

**Abstract:** In order to find a relation between acoustic characteristics and physiological properties of Red Fuji apples, experiments are carried out based on sound radiation and sound diffraction from apple surface. The samples of Red Fuji apples were stored at different temperature and different time. A technique based on echo wave amplitude, wave propagation velocity and attenuation was applied to evaluating apple quality during storage period. Results showed as follows: Ultrasonic echo wave amplitude, apple weight and attenuation coefficient decreased with the increase of the storage time at certain temperature. The higher the storage temperature was, the faster the ultrasonic echo wave amplitude and attenuation coefficient slowed down in certain storage time. The same rule as fruits weight. After the apple picked the mature speed of earlier preserve period was slow, but after the mature speed of the later preserve period was quick. The physical parameters of Red Fuji apples were highly correlated with its ultrasonic properties. These changes may be used to evaluate apple quality during storage period.

**Key words:** Red Fuji apples; storage temperature; physics character; storage time; ultrasonic nondestructive testing

果品在采后储藏期间,其内部在继续进行着成熟过程,各种物理、化学、生理参数都在不断变化<sup>[1]</sup>。果品的声学特性是指农产品在声波作用下的反射特

性、散射特性、透射特性、吸收特性、衰减系数、传播速度及其本身的声阻抗与固有频率等,反映了声波与果品间相互作用的基本规律<sup>[2]</sup>。果品的声学特性

收稿日期] 2006-09-11

基金项目] 陕西省教育厅专项基金项目(2004A04)

作者简介] 莫润阳(1968-),女,陕西富平人,讲师,在读博士,主要从事声学检测及工业无损检测研究。

E-mail: mmrriycn@snnu.edu.cn.

随果品内部组织的变化而变化,不同果品的声学特性不同,同一种类不同品质的果品其声学特性也往往存在差异。利用超声检测技术对水果品质进行检测,关键在于建立超声特性与产品特性(成熟度、硬度等)之间的关系。果蔬细胞间存在空穴结构,一定频率的超声波在这种结构中会形成共振,共振频率与果蔬硬度、成熟度有关。当然,也因为这种效应的存在,使超声波在果蔬中的衰减系数较大,声波传播速度很低(与空气中的波速相近甚至更低)<sup>[3]</sup>。

利用果品的声学特性对其进行无损检测与分级,是近 30 年发展形成的新技术,国内外已有部分学者对此作了一些基础性研究工作。Abbott 等<sup>[4]</sup>对苹果的声学特性进行了研究,发现苹果在受到声波激励后其共振点频率强烈地受苹果尺寸和硬度的影响;Chen<sup>[5]</sup>研究发现,苹果的硬度、尺寸和形状是影响苹果声波响应特性的主要因素。Armstrong 等<sup>[6]</sup>通过研究 5 种不同品种桃子的声学特性后发现,桃子的声波响应特性与其硬度具有较高的相关性。Belie 等<sup>[7]</sup>用声脉冲响应技术对梨的硬度变化进行了监测,发现梨的硬度与其声脉冲响应特性的相关性达到 0.82,可以利用声波检测技术确定梨的适宜采收时间。以色列农业研究所 Mizrach 为首的研究小组对在不同生长期、成熟度时鳄梨、芒果等的硬度、固溶物含量、含糖量等与果品声学特性的关系进行了大量研究<sup>[8-12]</sup>,结果已在多个国家获得专利(以色列专利 NO. 109406,美国专利 NO. 5589209,法国专利 NO. 95048699(April24, 1995))。我国在这方面的研究起步较晚,何东健等<sup>[13]</sup>、王书茂等<sup>[14]</sup>测定了西瓜果实的打击音波曲线,并对打击音波特性值、感官评价值与基础特性之间的相关性进行了分析,结果发现西瓜成熟度及含糖量与西瓜振动基频有良好的相关性。这些研究提示,可以用超声波来检测苹果的物理特性,但目前尚未见此方面的报道。本试验对不同种类、不同储期苹果的物理特性,尤其是声学特性进行了研究,以期建立苹果声学特性参数数据库,为寻求苹果特性评价的新方法提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 苹果样品的准备及储藏

样品分 2 组, 1 组为 2004-03-20 从市场上购回的大小、外形、色泽较为一致、无任何外伤的 6 个洛川红富士苹果(大约在 2003 年 10 月上旬采摘),分成 A、B、C 3 组(分别在苹果表面标记 A1,

A2;B1,B2;C1,C2),用保鲜膜包好,分别在 15、17 和 8℃ 环境下储藏; 2 组共有红富士苹果 6 个(分别记为 1,2,3,4,5 和 6 号),于 2004-10-03 日采摘自陕西泾阳县王桥镇某果园,果树为半坡生长环境,采后及试验期间,一直在室内恒温(19~20℃)条件下于保鲜袋内保存。 2 组所有样品于每次测完后,用保鲜膜包好,放入预定环境中储藏。

### 1.2 测试装置

苹果表面声波反射特性检测系统见图 1。由超声分析仪(型号为 5052UA,美国 Panametrics 公司产)、超声传感器、数字示波器(型号为 TDS3032,采样频率为 300 MHz)、水槽、夹具等组成。超声分析仪产生脉冲电信号,经超声换能器转换成声脉冲,通过传声介质水入射到苹果表面,经表面反射后回波信号由传感器接收并送入示波器得以显示。声波传感器采用主频率为 2.5 MHz 的收发两用探头,用来发射和接收经苹果表面反射的超声信号。试验时用夹具将苹果固定在水槽中,探头表面没入液体并和苹果表面的距离保持一定(15 mm),声束入射方向与苹果表面垂直。

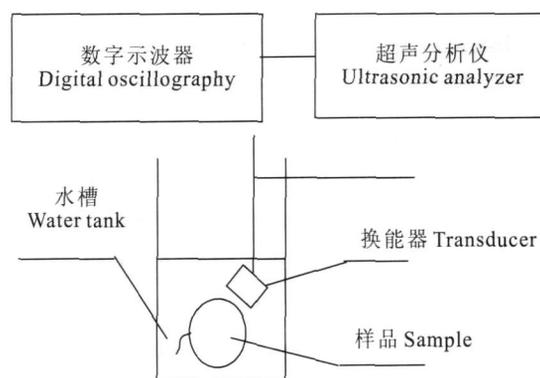


图 1 苹果表面声波反射特性测试装置

Fig. 1 Experimental arrangement for the pulse amplitude of the reflected wave

苹果对声波的衰减特性检测系统,由超声非金属检测仪(型号为 CTS-35A)和 2 个低频探头组成(图 2)。试验选用 2 个 100 KHz 换能器,1 个用于发射声波进入苹果,另 1 个用于接收穿透苹果后的透射声波,两探头沿苹果赤道放置。对每个样品在不同的标记位置进行超声无损检测,超声信号的衰减可据公式  $A = A_0 e^{-\alpha l}$  计算。式中: $A$  和  $A_0$  分别为超声信号经  $l$  路径后的幅度和起始幅度; $\alpha$  为声衰减系数; $l$  是发射换能器与接受换能器间的距离。苹果特性不同,接收换能器收到的信号所包含的信息不同。

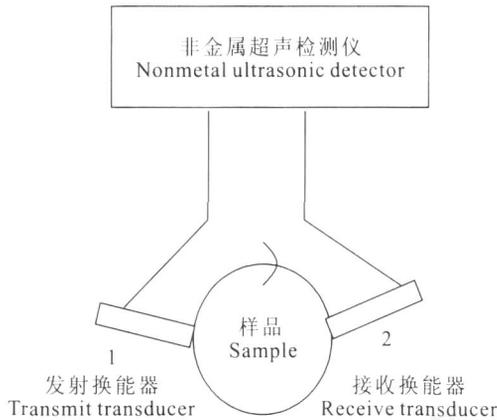


图 2 苹果对声波的衰减特性检测系统  
Fig.2 Experimental arrangement for the pulse amplitude of the transmitted wave

### 1.3 测试项目与方法

组样品测试于 2004-03-27 开始,每隔 24 h 对 A、B、C 3 组分别进行测试,2004-04-04 结束,历时 9 d; 组样品的测试于 2004-10-10 开始,每隔 7 d 测试 1 次,于 2004-12-14 结束,历时 64 d。主要测试项目包括:

- 通过目视、触摸检查苹果外观状况;
  - 用分析天平测量苹果质量;
  - 利用图 1 所示装置对声波在样品表面的第一次界面回波的幅度进行测试,进而了解苹果表面声波的反射特性;
  - 声波在苹果中的传播特性;
  - 苹果对声波的衰减特性。
- 和 利用图 2 所示装置对声波经果皮、果肉后透射波的幅度进行了测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果的外观状态

对 组样品的外观状态进行目视检查。结果显

表 1 组苹果储藏过程中质量的变化  
Table 1 Quality change in samples of group

组别 Group	储藏天数 Storage days								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A <sub>1</sub>	168.9	168.1	167.5	167.1	166.7	166.3	166.1	165.8	165.4
A <sub>2</sub>	166.1	165.7	165.2	165.0	164.8	164.1	163.9	163.5	163.2
B <sub>1</sub>	146.4	145.7	145.1	144.4	143.8	143.3	143.1	142.7	142.2
B <sub>2</sub>	186.0	185.5	184.9	184.6	184.1	183.6	183.2	182.7	181.9
C <sub>1</sub>	205.8	205.6	205.5	205.5	205.4	205.3	205.3	205.2	205.1
C <sub>2</sub>	204.7	204.5	204.5	204.5	204.4	204.3	204.2	204.2	204.2

样品 组储藏过程中质量的变化见表 2。从表 2 可知,样品 组在 65 d 的储藏过程中,质量减少了 5.1 ~ 17.3 g,说明在同样的储藏条件下,各样品失水程度不同。质量变化最大的 6 号样品,储存期间

示在 3 种储藏条件下,苹果样品开始时表皮色彩鲜亮光滑;储藏 9 d 以后,A、B 组出现了明显的萎缩现象,表皮发皱,手感发软,有明显失水现象,且 B 组变化稍微严重;C 组几乎无明显变化,表皮颜色依旧鲜亮,有光泽。原因是 B 组储藏温度最高,苹果后成熟速度较快,失水率较高,而 C 组由于储藏温度低,后成熟缓慢,失水较少。

样品 组一直在恒温室内环境 19 ~ 20 、保鲜袋内存储,储藏期间苹果外观状况变化不明显,表皮未出现明显萎缩。

与样品 组相比, 组样品经过近 2 个月相对较高温度储藏后,其外观状况整体较好。其原因应归于样品本身, 组样品是在当年 10 月采摘,这是苹果刚刚成熟的季节;而 组样品是在前 1 年的 10 月采摘的,无论在怎样的条件下储藏,也已继续成熟了 5 个多月。说明,苹果采后储藏前期的后成熟速度较慢,而储藏后期后成熟速度较快。

### 2.2 苹果在储藏过程中质量的变化

组苹果样品储藏过程中质量的变化见表 1。由表 1 可以看出,B 组苹果的质量变化最大,B1 储藏第 1 天和第 9 天质量差值为 4.2 g,质量损失率达 2.9%,平均每天损失 0.467 g; A 组苹果的质量变化次之,A1 第 1 天和第 9 天相差 3.5 g,质量损失率为 2.07%;C 组苹果质量变化最小,C2 第 1 天和第 9 天相差 0.5 g,质量损失率为 0.24%。说明,苹果质量损失与储藏温度有密切关系,储藏温度越高,质量损失越严重。苹果质量损失主要是由于失水造成的。

平均每天损失 0.266 g。 组中 B 组储藏温度和 组近似,但 组样品平均每天质量损失较 B 组小得多,说明储藏初期苹果质量变化速度较储藏后期慢。

表 2 组苹果储藏过程中质量的变化  
Table 2 Quality change in samples of group

序号 Number	储藏天数 Storage days								
	7	14	21	28	35	42	49	56	63
1	269.1	268.5	268.0	267.8	267.5	267.3	266.1	265.1	264.0
2	289.7	289.0	287.6	286.5	286.0	284.5	282.9	280.9	278.5
3	284.3	283.2	282.2	281.3	279.7	277.8	275.2	273.5	271.7
4	268.3	267.7	266.3	265.6	264.5	263.2	261.1	260.1	258.8
5	257.5	257.1	256.0	255.2	254.6	254.0	253.2	251.7	250.2
6	287.5	286.0	284.3	283.3	282.1	280.7	278.7	274.5	270.2

### 2.3 苹果表面反射回波幅度的变化

样品组在储藏过程中,苹果表面第 1 次反射回波幅度与储藏时间的关系如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出,组所有样品随着储藏时间的增加,表面回波幅度下降,且同一储藏环境下的同组样品,下降程度相似(如 A1 和 A2, B1 和 B2, C1 和 C2 所对应的曲线近乎平行),但由于同组样品的个体存在差异,故其回波曲线并不重合。A, B, C 3 组中, B 组回波曲线的下降幅度最大,在 9 d 内 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 分别下降了 0.73 和 0.53 mV; A 组样品的变化居中,在 9 d 内 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 分别下降了 0.33 和 0.29 mV; C 组样品回波曲线的下降幅度最小,在 9 d 内 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 分别下降了 0.18 和 0.2 mV。造成这种差异的直接原

因是各组储藏温度不同, B 组储藏温度最高, 回波曲线的下降幅度最大; C 组储藏温度最低, 回波曲线的下降幅度最小。说明随着储藏温度的降低, 回波幅度下降趋势减慢。由声学理论可知, 声波垂直入射到异质界面(压电晶片/苹果)上, 其反射特性取决于两侧介质的特性阻抗  $R$ , 且  $R = \rho c$ , 式中:  $\rho$  为介质密度,  $c$  为介质中的声速。对压电晶片/苹果界面, 若压电晶片特性阻抗为  $R_1$ , 苹果为  $R_2$ , 则反射回波的幅度与  $\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}$  的比值成正比。由于  $R_1$  为一定数, 于是回波幅度高低由苹果的特性阻抗来决定, 回波曲线的下降幅度越快, 说明苹果特性阻抗变化越大。

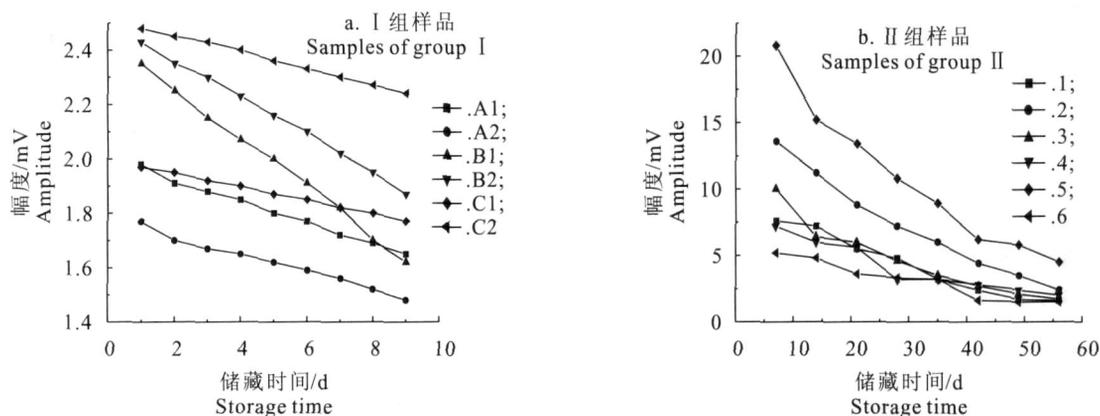


图 3 苹果反射回波幅度变化曲线

Fig. 3 Variation of the values of reflection wave amplitude from sample surfaces and storage time

组样品在储藏过程中反射回波幅度的变化如图 3(b)所示。图 3(b)表明,随储藏时间的延长,所有样品表面回波幅度均呈降低趋势,但各样品下降速度不同,这是由于样品在采摘时成熟程度不完全相同而造成的,如样品 5 和 2 与其他样品在开始时特性就有较大差异,可以通过生化测试来进一步研究。

### 2.4 声波在苹果中传播的速度

本试验中,发射换能器与接收换能器之间的夹角保持不变,所选样品外径也大致相同(约 75 ~ 80

mm),故两探头之间的距离也基本相同。当声波信号经过果皮至果肉进而被另一换能器接收,通过对声波在苹果中传播时间(声时)的测定,可知声波在苹果中的传播速度。声速是反映材料特性的重要参数,若果肉可近似成均质、各向同性的材料,则其声速  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 。式中:  $E$  为材料弹性参数,  $\rho$  为材料密度。组样品的声波传播特性见图 4。由图 4 可知,随着储藏时间的延长,超声波在样品中传播相同的距离所需的时间增加,声速下降。说明随着苹果

储藏时间的延长,其弹性、密度均会发生变化。

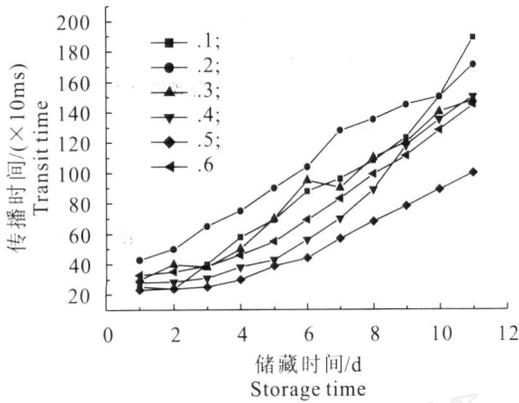


图 4 声波在 I 组苹果样品中的传播特性

Fig.4 Ultrasound transmit characteristics in samples of group I

### 2.5 苹果对声波的衰减特性

植物生物媒质不同于流体媒质,具有结构不均匀性,因而当超声波在生物组织中传播时,引起声能衰减的机理很复杂。声波在这类媒质中传播时,超

声衰减主要是由超声吸收与超声散射两部分组成,即一部分是由于媒质中质点间粘滞性、热传导及多种复杂的弛豫过程而引起的超声吸收,它把有序的声波转变成媒质的热能和内能;另一部分则是由于声波在不均匀的组织结构上的声散射将声波能量散射到其他方向而使原来传播方向上的声波能量减弱<sup>[15]</sup>。本试验中声波穿透苹果后被另一换能器接收,通过对穿透的超声信号幅度变化的检测,可知苹果对声波的衰减程度。I 组苹果在储藏过程中衰减系数与储藏时间的关系分别见图 5(a)和 5(b)。从图 5(a)和 5(b)可看出,超声衰减系数随着储藏时间的延长而逐渐降低。从图 5(a)还可以看出,3 组样品衰减特性不同,但每组样品的衰减特性曲线却近似平行,即有相似的变化规律;3 组样品中,B 组曲线斜率最大,声衰减系数降低最快,C 组曲线斜率最小,声衰减系数降低最慢。从储藏温度来看,B 组样品储藏温度最高,C 组最低,可以说储藏温度越高,超声衰减系数降低越快。

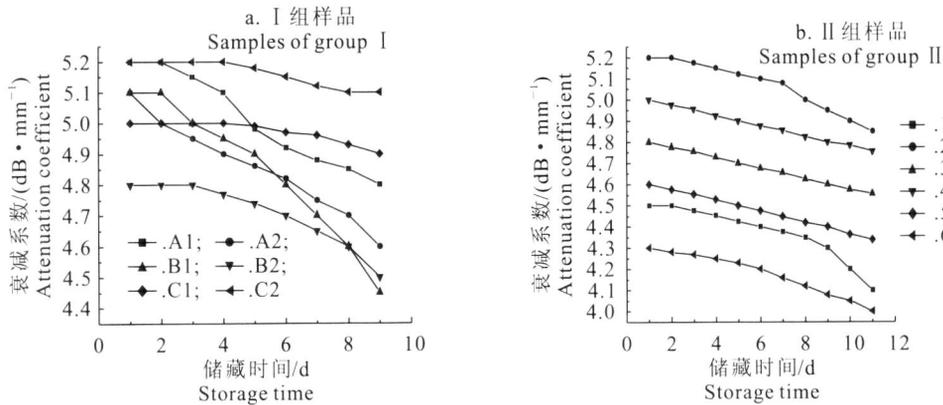


图 5 超声衰减系数与苹果储藏时间的关系

Fig.5 Relation between the attenuation coefficient and storage time

## 3 结 论

苹果在采后储藏过程中,其内部发生着各种物理、化学的变化;苹果物理特性与苹果表面声波反射特性、传播特性和衰减特性之间确有对应关系,利用这种对应关系可实现苹果特性超声无损评价。通过对苹果反射回波幅度变化、声波在苹果中传播速度、超声衰减系数等数据的分析,可构建出一个反映苹果内部质量的数学模型,

### [参考文献]

[1] 林向东,张琪,马丽.苹果中酶活性与贮藏效果相关性的研究[J].食品科学,2000,21(3):61-63.

[2] 吕飞玲,应义斌.声学检测技术在农产品品质无损检测中的应用[J].农机化研究,2003(1):145-151.

[3] 应义斌,蔡东平,何卫国.农产品声学特性及其在品质无损检测中的应用[J].农业工程学报,1997,3:208-212.

[4] Abbott J A. Nondestructive sonic firmness measurement of apples[J]. Trans of the ASAE,1995,38(5)467-476.

[5] Chen P. Development of a high speed NMR technique for sensing maturity of avocados[J]. Trans of ASAP,1996,39(6):2205-2209.

[6] Armstrong P R,Stone M L,Brusewitz G H. Peach firmness determination using two different nondestructive vibrational sensing instruments[J]. Trans of the ASAE,1997,40(3):699-703.

[7] Belie N D. Firmness changes of pear fruit before and after harvest with the acoustic impulse responsetechnique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2000,77(2):183-191.

- [8] Mizrach A, Galili N, Gan-mor S, et al. Models of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life[J]. J agric Engng Res, 1996, 65: 261-267.
- [9] Galili N, Shmulevich I, Benichou N. Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation[J]. Trans of the ASAE, 1998, 47(2): 399-407.
- [10] Mizrach A. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique[J]. Ultrasonics, 2000, 38: 717-722.
- [11] Mizrach A, Flitsannov U, El-Batsri R, et al. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements[J]. Scientia horticulture, 1999(80): 173-180.
- [12] Mizrach A, Flitsannov U. Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process[J]. Journal of Food Engineer, 1999(40): 139-144.
- [13] 何东健, 李增武, 王洪群. 西瓜打击音波特性的研究[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(3): 105-107.
- [14] 王书茂, 焦群英, 籍俊杰. 西瓜成熟度无损检验的冲击振动法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 241-245.
- [15] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 472.

(上接第 48 页)

- [5] Jermakowicz W J, Dorsey D A, Brown A L, et al. Development of the nasal chemosensory organs in two terrestrial anurans: the directly developing frog, *Eleutherodactylus coqui* (Anura: Leptodactylidae), and the metamorphosing toad, *Bufo americanus* (Anura: Bufonidae) [J]. J Morphol, 2004, 261: 225-248.
- [6] Stuelpnagel J T, Reiss J O. Olfactory Metamorphosis in the Coastal Giant Salamander (*Dicamptodon tenebrosus*) [J]. J Morphol, 2005, 266: 22-45.
- [7] Meyer D L, Ricarda Fackler I, Jadhao A G, et al. Differential labeling of primary olfactory system subcomponents by SBA (Lectin) and NADPH-d histochemistry in the frog *Pipa* [J]. Brain Research, 1997, 762: 275-280.
- [8] Bertmar G. Evolution of vomeronasal organs in vertebrates[J]. Evolution, 1981, 35: 359-366.
- [9] Eisthen H L. Presence of the vomeronasal system in aquatic salamanders[J]. Philos Trans R Soc Lond B, 2000, 355: 1209-1213.
- [10] Duchamp-Viret P, Duchamp A. Odor processing in the frog olfactory system[J]. Progress in Neurobiology, 1997, 53: 561-602.
- [11] Hoffman H H. The olfactory bulb, accessory olfactory bulb and hemisphere of some anurans[J]. J Comp Neurol, 1963, 120: 317-368.