

含氧硫醚类香料对常见致病菌的体外抑菌活性研究

梁颖,朱俊雅,张公亮*,甘未祺,孙黎明,侯红漫
(大连工业大学食品学院,辽宁大连 116034)

摘要:对11种含氧硫醚类香料的抑菌活性进行研究,并探讨其构效关系。以副溶血性弧菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和单增李斯特菌为供试致病菌,通过测量抑菌圈直径考察硫醚类香料的抑菌活性,并通过统计分析探讨结构的影响。结果显示在浓度为5 mol/L的条件下,3-(甲基硫基)丙醛(MTPD)、2-甲基-3-甲硫基呋喃(MMTF)、糠基异丙基硫醚(FIPS)和甲基糠基二硫醚(MFDS)对四种致病菌均有抑制作用,且抑菌能力为MTPD>MFDS>或≈FIPS>或≈MMTF。对比11种含氧硫醚类香料的抑菌活性,双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚(BMFDS)对金黄色葡萄球菌的抑制作用最强,MTPD次之,而BMFDS对其他三种致病菌无抑制作用。MTPD对副溶血性弧菌、大肠杆菌和单增李斯特菌的抑制作用均最强,且对副溶血性弧菌的作用效果最佳,其最低抑菌浓度为2.44 mmol/L。以上结果说明,醛基的存在对含氧硫醚类香料抑制副溶血性弧菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和单增李斯特菌具有重要作用。

关键词:含氧硫醚类香料,抑菌活性,致病菌

Antibacterial activity of oxygen-containing sulfide flavors against some common pathogenic bacteria *in vitro*

LIANG Ying, ZHU Jun-ya, ZHANG Gong-liang*, GAN Wei-qi, SUN Li-ming, HOU Hong-man

(School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Antibacterial activities of eleven kinds of oxygen-containing sulfide flavors were studied, and the effect of structure on their antibacterial activities was further investigated. The antibacterial activities of oxygen-containing sulfide flavors against *Vibrio parahaemolyticus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* were determined by measuring the diameter of inhibition zone. The effect of structure on their antibacterial activities was further investigated according to a statistical significance test. At concentration of 5 mol/L, 3-(methylthio) propionaldehyde (MTPD), 2-methyl-3-(methylthio) furan (MMTF), furfuryl isopropyl sulfide (FIPS) and methyl furfuryl disulfide (MFDS) showed antibacterial activities against all four kinds of pathogenic bacteria. The inhibitory effects of these sulfide flavors followed the order MTPD>MFDS>or≈FIPS>or≈MMTF. By comparing the antibacterial activities of eleven kinds of oxygen-containing sulfide flavors, bis(2-methyl-3-furyl) disulfide (BMFDS) showed the highest inhibitory effect against *Staphylococcus aureus* followed by MTPD, whereas BMFDS showed no effect on the other three pathogenic bacteria. MTPD showed the strongest inhibitor effects on *Vibrio parahaemolyticus*, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*, and the best action was found for *Vibrio parahaemolyticus*. The minimal inhibitory concentration of MTPD against *Vibrio parahaemolyticus* was 2.44 mmol/L. These results suggested that the aldehyde group play an important role in the antibacterial activity of oxygen-containing sulfide flavors against *Vibrio parahaemolyticus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*.

Key words: oxygen-containing sulfide flavors; antibacterial activity; pathogenic bacteria

中图分类号: TS202.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)18-0108-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.18.013

食品香料中包含多种含硫香料,其中具有R-(S)
n-R'结构的化合物称为硫醚,是可食用含硫化化合物
品种最多的一类^[1]。根据硫原子的个数,硫醚类香料

可分为单硫醚和多硫醚(包括二硫醚、三硫醚及四硫
醚),一般具有洋葱、大蒜、肉或坚果的香味^[1],在食品
调香中广泛应用。一些硫醚类香料具有含氧官能团,

收稿日期: 2014-12-19

作者简介: 梁颖(1988-),女,硕士研究生,研究方向:食品微生物技术,E-mail: dliangying@163.com。

* 通讯作者: 张公亮(1978-),男,博士,副教授,研究方向:食品色香味化学,E-mail: zhanggl1978@hotmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31201419);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2012199);辽宁省高校重大科技平台(教发[2011]191)。

通常以醛基、酯基、呋喃基、糠基的形式存在,赋予硫醚类香料更多的功能性质。

硫醚类香料具有一定抗菌活性,研究报道主要集中在烯丙基硫醚类化合物。例如,烯丙基二甲基硫醚对胸膜肺炎放线杆菌有抑制作用^[2];二烯丙基二硫醚和二烯丙基硫醚对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、大肠杆菌均有抑制作用^[3];二烯丙基三硫醚类和二烯丙基四硫醚对革兰氏阳性菌:蜡样芽孢杆菌、单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌,革兰氏阴性菌:弯曲杆菌、大肠杆菌、沙门氏菌、霍乱弧菌均有明显抑制作用^[4]。前期研究显示:二甲基硫醚类化合物可以诱导白血病细胞凋亡^[5],并可促进紫外线(UVA)诱发的类胡萝卜素降解^[6],与UVA和 β -胡萝卜素有协同诱导白血病细胞凋亡的作用^[7]。

目前国内外对硫醚类香料或硫醚化合物的研究主要集中在大蒜或大蒜提取物或者葱属植物^[8-10]。对硫醚类香料的抑菌构效关系尚不明确。本文在前期研究的基础上,针对八种硫醚对称性硫醚香料,分析其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、志贺氏菌及枯草芽孢杆菌的抑菌活性,发现硫原子个数对

简单硫醚类香料的抑菌活性与硫原子数和烯丙基有关^[11]。通过对含氧硫醚类香料细胞毒性的筛选,发现甲基2-甲基-3-呋喃基二硫醚、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚、二糠基二硫醚对白血病HL-60细胞具有较强的细胞毒性作用^[12]。作为前期研究的延续,本文继续选取11种含氧硫醚类香料,以金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌、大肠杆菌、副溶血性弧菌为供试菌,比较抑菌活性。初步探究结构相对复杂的硫醚香料的抑菌活性及构效关系,为揭示硫醚类化合物抑菌作用机理及构效关系奠定研究基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*) CICC23656、单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*) CICC21662、大肠杆菌(*Escherichia coli*) CICC20658、副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*) CICC21619均来自大连工业大学食品学院微生物实验室;11种硫醚类香料 购自美国Sigma公司,种类及分子结构见表1;无水乙醇 分析纯,沈阳力诚试剂厂;牛肉膏、蛋白胨 生化试剂,北京奥博星生物技术有限责

表1 十一种含氧硫醚类香料的名称及结构

Table 1 Name and structure of 11 kinds of oxygen-containing sulfide flavors

编号	中文名称	英文名称	缩写	结构
1	3-(甲硫基)丙醛	3-(Methylthio) propionaldehyde	MTPD	
2	3-甲硫基丙酸甲酯	Methyl 3- methylthiopropionate	MMTP	
3	3-(甲硫基)丙酸乙酯	Ethyl 3-methylthiopropionate	EMTP	
4	2-甲基-3-甲硫基呋喃	2-Methyl-3- (methylthio) furan	MMTF	
5	糠基异丙基硫醚	Furfuryl isopropyl sulfide	FIPS	
6	二糠基硫醚	Difurfurylsulfide	DFS	
7	3-糠硫基丙酸乙酯	Ethyl 3-(furfurylthio) propionate	EFTP	
8	甲基2-甲基-3-呋喃基二硫醚	Methyl (2-Methyl-3-furyl) disulfide	MMFDS	
9	双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚	Bis (2-methyl-3-furyl) disulfide	BMFDS	
10	甲基糠基二硫醚	Methyl furfuryl disulfide	MFDS	
11	二糠基二硫醚	Difurfuryl disulfide	DFDS	

任公司;氯化钠 分析纯,天津市广成化学试剂有限公司;牛肉膏蛋白胨琼脂培养基 牛肉膏0.3%,蛋白胨1%,氯化钠0.5%,琼脂1.5%,pH7.2~7.4,121℃下灭菌20 min。

ZHWY-100B型恒温培养振荡器、ZHJH-C1112C型超净工作台 上海智城分析仪器制造有限公司;01J2003-04型高压灭菌锅 上海博讯实业有限公司;DRP-9162型电热恒温培养箱 上海森信实验仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 抑菌圈的测定 采用滤纸片法,测定抑菌圈的大小^[13]。将11种含氧硫醚类香料用无水乙醇稀释成5 mol/L,混合均匀,密封避光备用。在无菌条件下,取100 μL菌液均匀涂布于固体培养基上。将已灭菌的直径为1 cm的圆形滤纸片平铺于干净的平皿上,加入6 μL硫醚类香料,用无菌的镊子将纸片贴于培养基上,置于37℃培养18~24 h。每个样品做3组平行,以无水乙醇作为阴性对照,实验结果取其平均值。

1.2.2 最低抑菌浓度(MIC)的测定 采用二倍稀释法将硫醚类香料用60%乙醇稀释成浓度分别为5、2.5、1.25、0.625 mol/L,直至610.35 μmol/L。取0.1 mL溶液加入到装有0.8 mL营养肉汤培养基的试管中,再接入0.1 mL供试菌的菌悬液,充分振荡均匀,使各管中含菌量为 10^6 cfu/mL。将试管放入37℃下培养24 h后,从各肉汤管中取出培养液0.1 mL,分别涂布平板,培养24 h^[14]。观察有无细菌生长,若有细菌生长,记为阳性(+);若无细菌生长,记为阴性(-);以无细菌生长的药物最低浓度为MIC。另外,以60%乙醇做阴性对照,以不添加60%乙醇和含氧硫醚类香料的培养基为空白对照,每种处理做3个平行。

1.2.3 统计分析 采用<http://www.physics.csbsju.edu/stats/t-test-bulk-form.html>在线软件进行student's *t*检验, $p<0.05$ 具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 含氧硫醚类香料对四种供试菌的抑菌活性

本研究选取的11种常见的含氧硫醚类香料,它们在结构上具有如下三个特点:a.一些含氧硫醚类香料具有相同的硫原子数,侧链结构不同,例如单硫醚化合物(MTPD、MMTP、EMTP、MMTF、FIPS、DFS、EFTP),双硫醚化合物(MMFDS、BMFDS、MFDS、DFDS);b.一些含氧硫醚类香料具有相同的侧链结构,但硫原子数不同,如MMTF和MMFDS、DFS和DFDS;c.一些含氧双硫醚为同分异构体,如MMFDS和MFDS, BMFDS和DFDS。

根据11种含氧硫醚类香料的原液浓度,选择5 mol/L作为起始浓度,在该浓度下各含氧硫醚类香料对供试菌的抑制作用见表2,1~11为含氧硫醚类香料的编号。结果表明,各有7种含氧硫醚类香料对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、副溶血性弧菌有抑制作用,只有6种硫醚类香料对单增李斯特菌有抑制效果,可见单增李斯特菌对含氧硫醚类香料敏感度较其他3种菌弱。对4种供试菌均有抑菌效果的含氧硫醚类香料有四种,包括MTPD、MMTF、FIPS和MFDS。只针对某一治病菌有抑制作用有四种,包括MMTP对

大肠杆菌,又如EFTP、BMFDS、DFDS对金黄色葡萄球菌。而EMTP硫醚类香料只对大肠杆菌和副溶血性弧菌这两种革兰氏阴性菌有抑制作用,对另外两种革兰氏阳性菌则没有抑制作用。

表2 十一种含氧硫醚类香料对供试菌的抑制作用

Table 2 Inhibitory effect of 11 kinds of oxygen-containing sulfide flavors on the tested bacteria

菌种	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
金黄色葡萄球菌	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	+
单增李斯特菌	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-
大肠杆菌	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-
副溶血性弧菌	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-

注:“+”表示有抑菌效果,“-”没有抑菌效果。

2.1.1 含氧硫醚类香料对金黄色葡萄球菌的抑制作用 以金黄色葡萄球菌为供试菌,选取对其有抑菌效果的含氧硫醚类香料进行抑菌圈实验。如图1所示,7种含氧硫醚香料对金黄色葡萄球菌具有不同程度的抑制作用。BMFDS和MTPD都有显著的抑菌效果,抑菌圈大小分别在 (3.11 ± 0.17) cm和 (2.71 ± 0.1) cm,比较7种含氧硫醚类香料的抑菌能力大小为BMFDS>MTPD>MFDS>FIPS≈DFDS>MMTF>EFTP。BMFDS和DFDS分子式均为 $C_{10}H_{10}O_2S_2$,前者-S-S-侧链两端连接的基团均为呋喃基,后者连接的均为糠基。BMFDS对金黄色葡萄球菌的抑制能力显著强于DFDS($p<0.05$),说明对于这两种对称含氧硫醚类香料,其结构中呋喃基团对抑制金黄色葡萄球菌的作用要强于糠基。MMFDS和MFDS分子式均为 $C_6H_8OS_2$,前者-S-S-侧链一端连接的基团为呋喃基,后者连接的是糠基。MFDS对金黄色葡萄球菌具有显著的抑制作用($p<0.05$),而MMFDS对金黄色葡萄球菌没有抑制作用。说明对于这两种含氧硫醚类香料,糠基对金黄色葡萄球菌的抑制作用强于呋喃基。

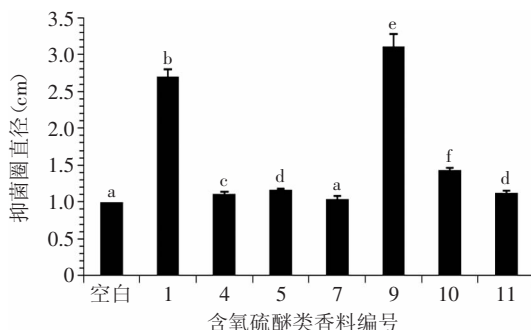


图1 含氧硫醚香料对金黄色葡萄球菌的抑制作用

Fig.1 Inhibitory effect of oxygen-containing sulfide flavors on *Staphylococcus aureus*

注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.1.2 含氧硫醚类香料对单增李斯特菌的抑制作用

以单增李斯特菌为供试菌,选取对其有抑菌效果的含氧硫醚类香料进行抑菌圈实验。由图2可知,在6种硫醚类香料中,MTPD的抑菌活性最强,抑菌圈达到3.38~3.45 cm,6种硫醚类香料的抑菌作用大小为:

MTPD>MFDS>MMFDS $\approx$ FIPS $\approx$ MMTF>DFS。MMFDS和MFDS为同分异构体,对单增李斯特菌的抑制作用为MFDS>MMFDS ($p<0.05$),这与作用于金黄色葡萄球菌的效果相同,说明针对这两种含氧硫醚类香料,糠基对单增李斯特菌的抑制作用强于呋喃基。MMTF和MMFDS侧链均为甲基和糠基,但主链硫原子数不同,随着硫原子数的增多,甲基糠基硫醚类香料对单增李斯特菌略有提高,说明对于结构相对复杂的含氧硫醚类香料,硫原子的数量对单增李斯特菌的抑菌效果影响不大。

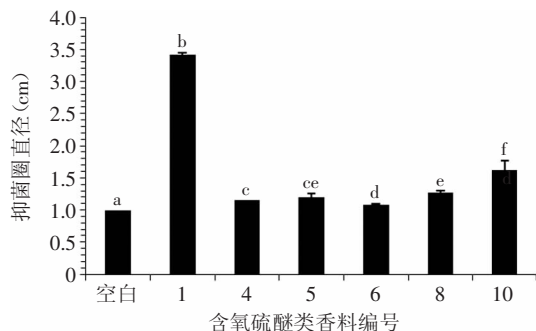


图2 含氧硫醚香料对单增李斯特菌的抑制作用

Fig.2 Inhibitory effect of oxygen-containing sulfide flavors on *Listeria monocytogenes*

2.1.3 含氧硫醚类香料对大肠杆菌的抑制作用 以大肠杆菌为供试菌,选取对其有抑菌效果的含氧硫醚类香料进行抑菌圈实验。由图3可知,同单增李斯特菌结果类似,MTPD在7种含氧硫醚类香料中对大肠杆菌的抑制作用最好,抑菌圈达到3.68~3.83 cm。另外6种含氧硫醚类香料的抑菌活性相对较低,其中MMTF、FIPS、MMFDS和MFDS的抑菌能力相当 ($p>0.05$),抑菌圈大小在1.24~1.53 cm。对于MMTF和MMFDS而言,硫原子数的增加未使含氧硫醚类香料对大肠杆菌的抑菌活性提高,这与简单对称硫醚类香料——二甲基硫醚类香料的抑菌活性不同^[1]。MMFDS和MFDS作为同分异构体,对大肠杆菌的抑制能力没有显著的差别 ($p>0.05$),而MMTP和EMTP对大肠杆菌仅具有微弱的抑菌效果。

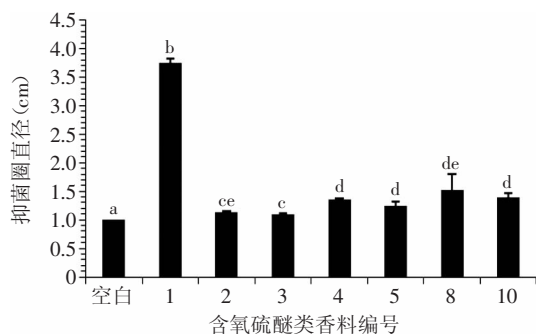


图3 含氧硫醚香料对大肠杆菌的抑制作用

Fig.3 Inhibitory effect of oxygen-containing sulfide flavors on *Escherichia coli*

2.1.4 含氧硫醚类香料对副溶血性弧菌的抑制作用 以副溶血性弧菌为供试菌,选取对其有抑菌效果

的含氧硫醚类香料进行抑菌圈实验。如图4所示,与单增李斯特菌和大肠杆菌结果相同,MTPD在7种含氧硫醚类香料中表现出显著的抑菌效果,抑菌圈达到2.95~3.40 cm。MFDS次之,MMTF、FIPS和MMFDS对副溶血性弧菌的抑制效果无显著差别 ($p>0.05$),EMTP和DFS抑菌能力相对较弱。MMFDS和MFDS作为同分异构体,对副溶血性弧菌的抑制作用为MFDS>MMFDS ($p<0.05$),这与作用于金黄色葡萄球菌和单增李斯特菌的效果相同,说明针对这两种含氧硫醚类香料,糠基对副溶血性弧菌的抑制作用强于呋喃基。MMTF和MMFDS对副溶血性弧菌的抑菌效果相当 ($p>0.05$),这与作用于大肠杆菌的效果相同。

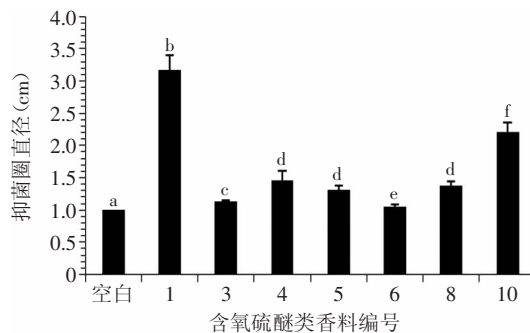


图4 含氧硫醚香料对副溶血性弧菌的抑制作用

Fig.4 Inhibitory effect of oxygen-containing sulfide flavors on *Vibrio parahaemolyticus*

综合含氧硫醚类香料对四种致病菌——金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌、大肠杆菌和副溶血性弧菌的抑制作用的比较发现,不同的硫醚类香料对一种致病菌的抑菌活性是不同的;同一种硫醚类香料对不同的致病菌可能有相同的趋势,也可能存在菌间差异。MTPD、MFDS、FIPS和MMTF对四种致病菌均有抑制作用,且抑菌能力大小为MTPD>MFDS>或 $\approx$ FIPS>或 $\approx$ MMTF。对四种致病菌都有显著抑菌活性的MTPD,为线性结构只含有一个硫原子,特征官能团为丙醛基。MTPD对四种致病菌抑制能力的大小分别为大肠杆菌>单增李斯特菌>副溶血性弧菌>金黄色葡萄球菌。由于其比其他含有两个硫原子甚至结构复杂的硫醚类香料抑菌效果更明显,所以可能是醛基的存在极大地加强了硫醚类香料的抑菌活性。

2.2 3-(甲硫基)丙醛对四种致病菌的最低抑菌浓度

选取对四种致病菌均有明显抑菌效果的MTPD测定其最低抑菌浓度,结果见表3。MTPD浓度大于625 mmol/L时,对四种致病菌均表现出良好的杀菌效果。MTPD对副溶血性弧菌、金黄色葡萄球菌的杀菌作用强于单增李斯特菌和大肠杆菌。其对副溶血性弧菌的MIC为2.44 mmol/L,对金黄色葡萄球菌的MIC为312.5 mmol/L,对单增李斯特菌和大肠杆菌的MIC均为625 mmol/L。

3 结论

本研究以11种含氧硫醚类香料为原料,采取滤纸片法,对四种致病菌的抑菌效果与构效关系比较分析得出以下结论:

表3 3-(甲硫基)丙醛对四种致病菌的最低抑菌浓度

Table 3 The minimal inhibitory concentration
3-(Methylthio) propionaldehyde

抑菌浓度	金黄色葡萄球菌	单增李斯特菌	大肠杆菌	副溶血性弧菌
625 mmol/L	-	-	-	-
312.50 mmol/L	-	+	+	-
156.25 mmol/L	+	+	+	-
78.13 mmol/L	+	+	+	-
39.06 mmol/L	+	+	+	-
19.53 mmol/L	+	+	+	-
9.77 mmol/L	+	+	+	-
4.88 mmol/L	+	+	+	-
2.44 mmol/L	+	+	+	-
1.22 mmol/L	+	+	+	+
610.35 μ mol/L	+	+	+	+

注：“+”表示有细菌生长；“-”表示没有细菌生长。

3.1 3-(甲硫基)丙醛(MTPD)、2-甲基-3-甲硫基呋喃(MMTF)、糠基异丙基硫醚(FIPS)和甲基糠基二硫醚(MFDS)对四种致病菌均有抑制作用,且抑菌能力为MTPD>MFDS>或 $\approx$ FIPS>或 $\approx$ MMTF。

3.2 3-(甲硫基)丙醛中醛基的存在可能极大地加强了含氧硫醚类香料的抑菌活性,且其对副溶血性弧菌的抑菌效果最好,最低抑菌浓度为2.44 mmol/L。

参考文献

- [1] 刘玉平,孙宝国.含硫食用香料的合成及应用[J].中国食品添加剂,2003(6):82-69.
- [2] Petra M B, Monique F M. Actinobacillus pleuropneumoniae is impaired by the garlic volatile allyl methyl sulfide(AMS) *in vitro* and in-feed garlic alleviates pleuropneumonia in a pig model[J]. Veterinary Microbiology, 2012, 154: 316-324.
- [3] Sergio C, Michele L, Bernardo M, et al. The role of diallyl

sulfides and dipropyl sulfides in the *in vitro* antimicrobial activity of the Essential Oil of garlic, *Allium sativum* L., and leek, *Allium porrum* L.[J]. Phytotherapy Research, 2013, 27: 380-383.

- [4] Rattanachaiakunsopon P, Phumkhachorn P. Shallot (*Allium ascalonicum* L.) oil: Diallyl sulfide content and antimicrobial activity against food-borne pathogenic bacteria[J]. African Journal of Microbiology Research, 2009, 3(11): 747-750.
- [5] Zhang Gong-liang, Wu Hai-tao, Zhu Bei-wei, et al. Effect of dimethyl sulfides on the induction of apoptosis in human leukemia Jurkat cells and HL-60 cells[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2008, 72(11): 2966-2972.
- [6] Zhang Gong-liang, Wu Hai-tao, Zhu Bei-wei, et al. Structuredependent photodegradation of carotenoids accelerated by dimethyl tetrasulfide under UVA irradiation[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2008, 72(8): 2176-2183.
- [7] Zhang Gong-liang, Wu Hai-tao, Zhu Bei-wei, et al. Induction of apoptosis by β -carotene and dimethyl tetrasulfide assisted by UVA irradiation in HL-60 cells[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2009, 73(5): 1014-1020.
- [8] 何祖光,柳枝,袁晓兵,等.大蒜提取液临床体外抗鲍曼不动杆菌的实验研究[J].实验与检验医学,2009,27(5):503-504.
- [9] Kyu H K. Antimicrobial properties of allium species[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2012, 23(2): 142-147.
- [10] Benkeblia N. Antimicrobial activity of essential oil extracts of various onions (*Allium cepa*) and garlic (*Allium sativum*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37: 263-268.
- [11] 张公亮,丁佳琪,董伟峰,等.几种硫醚类香料抑菌活性的研究[J].食品工业科技,2012,33(9):127-130.
- [12] 朱俊雅,张公亮,贾琼,等.几种硫醚类香料诱导HL-60细胞毒性的研究[J].现代食品科技,2014,30(2):42-47.
- [13] 江洁芳.花椒中抑菌活性成分提取工艺的研究[J].中国调味品,2011,36(3):30-32.
- [14] 常丽新,贾长红,高曼,等.丁香叶黄酮的抑菌作用研究[J].食品工业科技,2010,31(10):126-128.

(上接第102页)

- [21] Jane J. Current understanding on starch granule structures [J]. Journal of Applied Glycoscience, 2006, 53(3): 205-213.
- [22] Xie L H, Chen N, Duan B W, et al. Impact of proteins on pasting and cooking properties of waxy and non-waxy rice[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(2): 372-379.
- [23] Lii C Y, Shao Y Y, Tseng K H. Gelation mechanism

and rheological properties of rice starch[J]. Cereal Chemistry, 1995, 72: 393-400.

- [24] Jaisut D, Prachayawarakorn S, Varanyanon W. Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique[J]. Food Research International, 2009, 42: 674-681.
- [25] 大坪研一.米粉[M].日本:日本食粮新闻社,2012.

(上接第107页)

- Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(2): 6992-6997.
- [29] Rico E, Toldra F, Flores M. Effect of dry-curing process parameters on pork muscle cathepsin B, H and L[J]. European Food Research & Technology, 1991, 193(6): 541-541.
- [30] Zhou G H, Zhao G M, Wang Y L, et al. Time-related changes in cathepsin B and L activities during processing of Jinhua ham as a function of pH, salt and temperature[J]. Meat Science,

2005, 70(2): 381-388.

- [31] Armenteros M, Aristoy MC, Toldrá F. Evolution of nitrate and nitrite during the processing of dry-cured ham with partial replacement of NaCl by other chloride salts[J]. Meat Science, 2012, 91(3): 378-381.
- [32] Aliño M, Grau R, Baigts D, et al. Influence of sodium replacement on the salting kinetics of pork loin[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(4): 551-557.