

食品加工中的磁致生物学效应的研究进展

周慧吉¹, 马海乐^{1,2,*}, 吴平¹, 张赫男¹

(1.江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2.江苏省农产品物理加工重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要: 伴随科技的发展, 磁场已经用于各行各业。近年来, 磁场在食品方面也得到了广泛应用。研究方向主要集中在磁场对食物的保鲜作用, 磁场的杀菌效果以及磁场对于食用菌的生物效应。因此, 本文对磁场的作用机理以及该技术在食品工业中的应用等方面进行了概要阐述。

关键词: 食品; 农产品; 磁场; 生物学效应

Progress in Understanding Magnetic Biological Effect in Food Processing

ZHOU Hui-ji¹, MA Hai-le^{1,2,*}, WU Ping¹, ZHANG He-nan¹

(1. College of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Key Laboratory of Physical Processing and Agricultural Products in Jiangsu Province, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Along with the development of science and technology, magnetic field has been applied in all walks of life. In recent years, it also has been widely used in foods. Most recent studies mainly focus on the application of magnetic field in food preservation and sterilization as well as its biological effect on edible fungi. Therefore, this paper discusses the mechanism of action and application in the food industry of magnetic field.

Key words: food; agricultural product; magnetic field; biological effect

中图分类号: TS205.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2014)17-0285-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201417054

生物磁学是研究物质磁性和磁场与生物特性及生命活动之间相互联系相互影响的一门新兴边缘学科。随着研究的深入, 磁场作用于生物的效应与机理有了新的更深刻的认识, 磁场在更宽范围被应用于工农业生产, 然而在食品加工领域仍然仅集中于杀灭有害微生物, 以期提高食品的保质期。近几年, 人们开始从细胞和微生物水平探究磁场对食用动植物作用的生物学效应, 希望能从食物营养特性、功效成分结构特征等方面的变化, 寻求提高食品质量的新途径。

1 应用于生物处理的外磁场类型

在现代科学技术和人类生活中, 处处可遇到磁场, 发电机、电动机、变压器、电报、电话、收音机以至加速器、热核聚变装置、电磁测量仪表等无不与磁现象有关。甚至在人体内, 伴随着生命活动, 一些组织和器官也会产生微弱的磁场。按照磁场强度和方向可将磁场划分为恒磁场与动磁场(表1)。产生磁场有两种方法: 第一种是直接用电磁, 如稀土磁钢等永磁铁作为磁源; 另

一类是由电流产生的, 用线圈通电后产生的电磁场。当导线或线圈中通入直流电流时产生静磁场, 通入有变化的电流时则产生变动磁场。永磁材料本身所产生的磁场是静磁场, 但把它们安装在旋转或其他运动装置时, 也可以产生变动磁场。大部分电磁体为有阻磁体, 在普通电压下工作, 需要消耗一定量的电能, 产生大量的热, 所以要利用大量的水来冷却有阻磁体, 同时线圈通电后会出现电磁辐射。还有部分类型的磁体为超导材料, 虽然当电流流过超导材料不产生热量, 但却要在极低的温度下才能达到并维持超导状态, 需要利用液态氮和液态氦来维持超导磁体的低温状态。因此, 研究中尤其是对高强度电磁场需要精心设计和合理操作。

自然界一直存在电磁场。但直到20世纪期间, 由于对电的需求以及不断发展的无线电技术, 才使得人工电磁场源的需求量持续增加。常见的场源包括高压线路、家用电器、电脑, 以及高频或射频场。不同于位于电磁波谱上半部分的电离辐射(例如由放射性物质产生的 γ 射线、宇宙线和X线), 电磁场非常弱, 它们不能打断细胞内分子的化学键, 不能产生电离作用。因此, 电磁场的

收稿日期: 2013-09-25

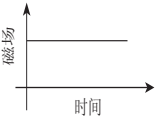
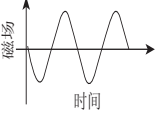
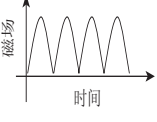
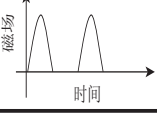
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271966)

作者简介: 周慧吉(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: zhouhuiji0523@163.com

*通信作者: 马海乐(1963—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: mhl@ujs.edu.cn

生物效应相对于超声等其他物理因素具有温和性，有些效应甚至可以恢复。

表1 磁场的分类
Table 1 Classification of magnetic field

磁场类型	特点	图形	举例
恒定磁场	磁场强度，方向均不变		永恒磁铁
交变磁场	磁场强度，方向规律变化		工频磁压机
脉动磁场	磁场强度规律变化，方向不变		同极旋转磁分离器、通过脉动直流电磁铁产生的磁场
脉冲磁场	间歇式出现磁场		间歇电流通入电磁铁的线圈各种形状的脉冲磁场

2 磁场基本的生物学特性

磁场能在机体内引起电动势而作用于机体，从而对生物体产生不同的生物学效应^[1]。这里所谓的生物效应包括正生物效应和负生物效应。磁场并非越大越好，也不是越小越好，而是特定的强度和作用时间会产生不同的效果，称为“窗口效应（window effect）”^[2]，而这个恰到好处的窗口是要靠不断的摸索才能找到的。

表2 体内带电物质
Table 2 The charged materials in the body

体内物质	蛋白质	DNA	生物水	组织液
带电粒子	构成成分氨基酸在水中接历程离子集团和电偶极子	碱基和磷酸酯存在离子集团和电偶极子	电偶极子	无机离子K ⁺ 、Na ⁺ 、Ca ²⁺ 、Cl ⁻

另外，生物是具有磁性的，从分子、细胞、组织器官中任一层次分析看^[3]，其体内都存在着顺磁性物质与逆磁性物质。每个生物细胞都可以看做一个微型电池，也可以看做一个微型磁极子。首先，体内存在着带电离子（表2），电荷运动产生磁场。其次，由于细胞膜内外各种离子具有不同的通透性，且分布不均匀，膜内外存在电位差，离子在细胞膜上离子通道中迁移时也会产生一定的生物电流。生物体的磁性、组成、种类、敏感性等同样会影响到生物学效应^[4]。因此，磁场的生物学效应是在磁场和生物体共同作用下才会产生，与两者的参数密切相连。不同磁场的类型及其物理参数（场强大小、均匀性、方向性、作用时间等）会导致不同的磁场生物效

应。变化磁场又因频率高低不同、作用时间长短不一也会产生不同的生物效应^[4]。

磁生物效应一般具有几个特点^[5]：1）窗口性：生物体只对某一特定强度的磁场产生效应；2）阈值性：磁场在某一范围内才能引起生物效应；3）滞后性：生物体必须经过一段时间才能表现出相对应的磁场作用；4）协同性：很弱的外加磁场能激发很强的生物响应。

3 农产品及食品加工中的磁致生物学效应

3.1 磁场对食品的保鲜作用

在食品产销链中，抑制细菌等生长能保证食品的新鲜度和品质。大量的研究发现，静态磁场对细菌生长有一定抑制作用，磁场强度不同作用效果不同^[6-8]。夏熹等^[9]将口腔嗜酸乳杆菌分为12.5、120 mT强度的静磁场加载组和未加载磁场对照组，厌氧培养 20 h。结果显示12.5 mT较低静磁场对口腔嗜酸乳杆菌生长无影响，而120 mT 静磁场能抑制细菌的生长。吴智艳等^[10]研究发现100 mT和500 mT的磁场对大肠杆菌、产气肠杆菌、普通变形菌和枯草芽孢杆菌的生理生化反应均存在不同影响，500 mT下的细菌表现出更短的阳性反应时间。这与之前邵伟等^[11]发现的100 mT和500 mT静磁场能延长大肠杆菌的世代时间和衰变速率的结果相一致。Novák等^[12]也发现低频磁场（ $B_m = 2.7 \sim 10$ mT， $f = 50$ Hz， $t = 0 \sim 12$ min，室温）会抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的生长，磁场强度越大，作用时间越长，抑制力就越大，这可能是由于磁场能影响培养基中的含氧量^[13]。静态弱磁场能抑制大肠杆菌的生长^[14-15]，提高其细胞内脱氢酶活力和胞内ATP浓度^[6]，而静态强磁场可明显降低衰亡期大肠杆菌的死亡速率^[16]。尹焕才等^[17]发现强磁场能影响枯草芽孢杆菌的芽孢形成速率，延长菌体的世代周期，降低菌体死亡，对菌体生长过程中产生的各种蛋白酶活力影响各异，然而其蛋白酶含量并没有显著变化。对于另一种与食品的腐败变质息息相关的酵母菌而言，Novák等^[12]发现静态强磁场对啤酒酵母有显著抑制作用。此外，基于食品中的微生物并非独立存在，其环境条件，如食品成分的不同对微生物受磁场作用的影响也有不同^[18]。因此研究人员将磁场与食盐介质相结合，发现它们之间存在协同联合作用，这也使得将磁场作为食品杀菌、抑菌的栅栏因子成为可能。高梦祥等^[19]用交变磁场处理草莓，可其果实中可溶性糖量比对照组降低，腐烂度也明显降低。

3.2 磁场对食品的杀菌作用

基于对磁场抑菌的研究，且传统加热杀菌会破坏食品的组织结构、营养成分和颜色风味等^[20-22]，高强

度脉冲磁场杀菌已经开始运用食品行业中^[23]。杨巧绒等^[24]研究了脉冲磁场对西瓜汁杀菌效果的最优参数,并且发现在最优参数条件下还原性VC和色素的破坏率很低,可溶性固性物含量和pH值几乎没有变化,天然色泽也基本保持原样。金江涛等^[25]也证实当磁感应强度达到17.3 T以上,脉冲数达到12个以上时,草莓汁中的霉菌、酵母菌可以被全部杀灭,菌落总数降到很低。同样,在牛奶^[26]、腐乳^[25]中也都存在类似的杀菌效果。高强度脉冲磁场作用下,随着磁场强度的增大或脉冲数的增加,菌落总数、大肠杆菌和霉菌酵母存活率基本呈下降趋势,然而达到谷值时,存活率又会随着磁场强度和脉冲数的进一步增大有所回升。因此只有找到最佳处理条件下才能最大程度满足商业上无菌的要求。根据大量实验,可得出结论,此法可有效地杀灭与食品有关的几十种细菌菌种,特别是果汁饮料中的黑霉菌、酵母菌。伊藤达弥^[27]甚至研究了一套清酒酿造的磁力杀菌系统。这些研究将电磁技术与食品科学相结合,为工业上的应用打下了基础。

本课题组10余年来一直致力于脉冲磁场杀菌的研究,并自行研制出脉冲磁场发生器用于本课题组杀菌实验。早在2002年,邓玉林等^[28]进行了最初的电磁场杀菌原理的探讨,认为场和电离的联合作用构成了杀死细菌体的主要因素;2003年,马海乐等^[29]进行了生啤酒磁激发脉冲电磁场杀菌的实验研究,结果显示当场强大于2.53 T及脉冲数大于10,或场强大于2.11 T及脉冲数大于30时,生啤酒中细菌残存总数小于50个/mL,达到商业无菌要求;同年,马海乐等^[30]报道了在进行西瓜汁高强度脉冲磁场杀菌过程中,在某些参数下出现反弹现象,即出现了场强为2.53 T,20个脉冲时,出现了最低残留率;随后的3.37 T,30个脉冲存留率反而升高;之后的4.22 T,40个脉冲时存留率又下降的曲折线,并且在2.53 T,20个脉冲时杀菌效果最好,达到我国果汁饮料的卫生指标;2004年,骆新峥等^[31]对脉冲磁场杀菌机理进行了分析,认为磁场的非热效应、感应电流效应、洛伦兹力效应、振荡效应、电离效应以及磁场作用下微生物的自由基效应等是影响微生物细胞结构特征的主要原因;同年,骆新峥等^[32]继续报道了场强达到2.53 T时,细菌致死率最高,随着场强的继续增加致死率反而增加的现象;同年,高梦祥等^[33]对牛奶进行脉冲磁场杀菌时,发现当场强达到8.85 T时,菌落总数和大肠菌群残留率都达到了谷值,但随场强再增加,杀菌效果反而变差;而脉冲数达到10时,存留率达到谷值,随后残留率开始升高,当达到20个脉冲数时,残留率又开始下降;同年,杨巧绒等^[34]在进行西瓜汁脉冲杀菌研究的过程中,发现了当场强都到达6.6 T,脉冲数分别为10、12个时,菌落总数和大肠菌群的残留率最低,随后再

次升高的现象;2008年,王合利等^[35]报道了大肠杆菌残留率随脉冲磁场的增加呈波动性下降趋势,在1.06、1.00、3.47 T时出现谷值,并且3.47 T时最低,说明杀菌鲜效果最好,而脉冲数达到20个时存留率达到谷值,随后存留率增加,杀菌效果变差;同年,朱春梅等^[36]研究高强度脉冲磁场对酵母菌、金黄色葡萄球菌的灭杀效果时,发现酵母菌的残留率随着场强的增加呈下降-升高-下降的趋势,并且在2.5 T和4.5 T,脉冲数都为25个时,酵母菌残留率达到谷值;2009年,马海乐等^[37]研究之前的实验数据发现在高强度脉冲磁场杀菌中出现了“窗口效应”,并且有一定的递推性,这是本课题组首次运用此概念来阐述之前的实验现象;2010年,许申时等^[38]对脉冲磁场杀灭金黄色葡萄球菌的研究中,得到了当脉冲数为20个时的磁场强度窗值的规律经验公式,以及Gelow模型下拟合得到的残留率动力学变化规律;2012年钱静亚等^[39]报道了在最佳强度窗下,介质温度为5℃、pH 4.5、水分活度为0.88时,残留率分别达到最低值。这些研究充分表明脉冲磁场技术在食品中应用前景,以及可能遇到的难题,如果能稳定运用“窗口效应”所带来的杀菌效果,那么对非热杀菌将有重要的价值。

3.3 磁场对食用菌等真菌生长的促进作用

近年来,磁场对食用菌的作用鲜有报道。早年有过研究,磁场能促进平菇生长,在菌体数量、色泽、整齐度方面都有所提高^[40]。徐忠传等^[41]以食用菌(杏鲍菇、秀珍菇、灵芝和香菇)菌丝体为对象,用6、12、17、27 mT 4种磁感应强度进行不同时间的磁处理,研究磁场对食用菌菌丝体生长所产生的正负生物学效应。结果显示只有适当条件的磁处理才能促进食用菌的生长,类似的还有磁场对凤尾菇菌丝体^[42]和金针菇子实体^[43]方面的研究。高梦祥等^[44]还研究了交变磁场对猴头菌生长效应的影响,不仅证实了磁场对猴头菌菌丝生长的促进作用具有阈值性,强度窗效应和时间窗效应,还发现磁场对菌丝体生长和胞外多糖产生的作用并不一致,胞外多糖的增加相对菌丝的增加有滞后性。他们认为磁场可能是改变了猴头菌细胞膜的通透性,导致胞外多糖不断外渗,使一部分菌丝衰老以致死亡,因此在一段时间后,菌丝干质量相对于对照组稍稍减少,而磁场胞外多糖一直表现为促进作用。之后,他们又以红曲霉为材料做了类似研究,发现低频交变磁场可促红曲霉生长、进而可改变其代谢途径,提高发酵效益^[45]。然而张海英^[46]发现强磁处理下,尽管随着处理强度的增大,蛹虫草产胞外多糖的量呈上升趋势,但均低于对照。这说明强磁场对蛹虫草胞外多糖的产生起抑制作用。

4 磁场的作用机制

磁场是一种相对较弱的物理因子,生物体内尚无确定的作用位点,磁场的作用因素也多,基于这些特点,磁场对生物作用机理的研究尚处于初步假设阶段。由于环境磁场是普遍存在的,必然会引起生物体生长、发育、繁殖、摄食等的变化。研究人员认为磁处理产生的生物效应主要是因为磁处理改变了某些分子包括生物大分子、自由基及细胞膜的理化性质。

4.1 磁场对细胞膜的作用机制

磁场对细胞膜功能影响作用机理假说很多,如磁场可能影响细胞膜的形态与结构,导致一些生理或生化过程的变化,从而影响与生物电活动相关的各种活动。还有认为磁场能影响细胞膜的电极分布,特别是 Ca^{2+} 的分布。Tenuzzo等^[47]研究不同细胞在静磁场(6 mT)作用下对细胞活力,细胞增殖,细胞内 Ca^{2+} 浓度和细胞形态的影响。结果显示一定强度静磁场会干扰细胞正常的程序性死亡过程,改变细胞的表面形态,增加细胞内 Ca^{2+} 的浓度。马海乐等^[48]利用Fura-2荧光探针法和激光共聚焦扫描显微镜(laser confocal scanning microscope, LCSM)法研究了受脉冲磁场处理后的*S. aureus*细胞的 Ca^{2+} 的跨膜行为,发现受磁场处理后,*S. aureus*胞内 Ca^{2+} 浓度显著升高,胞内荧光点强度显著增大,说明了大量 Ca^{2+} 涌入胞内,且与活菌数的减少显著相关达到-0.989 15,此跨膜行为导致的 Ca^{2+} 浓度升高被认为是脉冲磁场具有杀菌作用的重要原因。Triampo等^[49]对比了无磁场和暴露在(140±5) mT静磁场中的钩端螺旋体细胞,发现实验组细胞密度小,凝聚反应免疫性低,而且还出现了异常的大聚体形态。有研究指出静态磁场会显著破坏细胞表面,减少细胞膜表面疏水性结构^[15]。

4.2 磁处理对分子本身性质的影响

磁处理能改变一些分子包括核酸,蛋白质等生物大分子的理化性质。DNA或RNA具有靠氢键等次级键作用形成三维结构,磁场间接破坏这些分子内化学键,干扰化学键间的弱作用力,从而导致DNA结构发生相应变化。此外,DNA结构中的碱基对具有良好的导电性,运动的电子在弱磁场中受到洛伦磁力的作用会影响DNA复制。祝建等^[50]用(50 Hz、4 mT)磁场照射洋葱根尖细胞,其分裂增殖得到明显促进,当磁场和温度叠加达到一定程度时还会使细胞染色体出现异常。Phillips等^[51]发现磁场能引起染色体构象变化和微核形成,DNA损伤会引起细胞功能减弱甚至细胞死亡。

Triampo等^[49]将早期MG-63骨细胞暴露在低频脉冲磁场下45 min,发现磁场不影响细胞数,蛋白质合成或核结构,仅对细胞骨架蛋白分布产生明显变化。李刚等^[52]应用了全细胞膜片钳技术研究了不同工频磁场对离子通

道的影响,发现工频磁场能抑制通道的电流密度,降低半数激活电压和半数失活电压。这就说明工频磁场能通过影响细胞膜上蛋白质结构变化改变离子通道的正常结构。Ran Jingyu等^[53]的研究表明磁场能显著影响纤维素酶的活力,最高能比对照组提高37.01%,溶于缓冲剂的酶在磁场作用下结构发生了变化。研究中还发现处于磁场中的酶动力学参数 K_m 相比较对照组有所提高,酶催化效率降低,这可能是由于磁场导致了酶构象变化从而改变了酶和底物的结合力。

4.3 磁场对自由基的作用机制

自由基是指带有孤对电子的原子或原子团,既带电荷,又有磁矩,很容易受到磁场力的作用。在许多生命活动中都伴随有自由基的产生、变化或消失。研究表明静态磁场提高了自由基活力。例如,脑细胞中含有大量的铁离子,能将氧化呼吸产物过氧化氢催化成对细胞具有强毒性的羟自由基^[51]。也有研究显示旋转磁场作用于离体血液能明显升高超氧化物歧化酶活性,降低氧化脂质,这说明磁场具有抑制自由基,增强抗氧化能力^[4]。

目前有关磁处理对于一些化学成分或细胞结构的影响已经积累了大量的实验数据,尽管这些试验结果有一部分可以解释磁场的某些生物效应,但没有全部证实磁场对生物体可以产生影响,因此迄今为止,关于磁生物效应作用机制还没有公认的科学解释。

5 结 语

磁场作为环境因子,影响着许多生命活动过程,但是由于磁场的作用是多方位、多渠道的,是许多因素产生的综合效应,所以近百年来磁生物学效应实验重复性并不理想。原因就是生物体所处的时期和状态不同,不同生物体内信号物质和离子的分布及含量也不同,这种生物体本身的差异会导致即使在同一磁处理条件下,生物体最终产生的效应也会相差甚远。电磁场杀菌技术横跨电子学、化学、微生物学、物理学、工程技术等多门学科,是典型的交叉学科。迄今为止,在食品中的研究还处在一个发展阶段,尤其是对动物性食品,果蔬保鲜等方面还有许多问题亟待解决。

参考文献:

- [1] FUNK R H, MONSEES T, ÖZKUCUR N. Electromagnetic effects: from cell biology to medicine[J]. Progress in Histochemistry and Cytochemistry, 2009, 43(4): 177-264.
- [2] 邓光武,高梦祥. 微生物磁效应的研究进展[N]. 长江大学学报: 农学卷, 2010, 7(3): 58-62.
- [3] 韩毓旺,侯亚义,都有为. 生物电磁特性与电磁生物学效应的概述及最新进展[J]. 自然杂志, 2010, 32(6): 319-325.
- [4] 朱杰. 磁场的生物学效应及其机理的研究[J]. 生物磁学, 2005, 5(1): 26-29.

- [5] 李国栋. 当代磁学发展的特点和展望[J]. 生物磁学, 2002, 2(3): 3-5.
- [6] FILIPIC J B, KRAIGHER B, TEPUS, et al. Effects of low-density static magnetic fields on the growth and activities of wastewater bacteria *Escherichia coli* and *Pseudomonas putida*[J]. Bioresource Technology, 2012, 120: 225-232.
- [7] 程希雷, 依艳丽. 磁场处理对根瘤菌 (USDA110) 和 (USDA191) 数量及世代时间的影响[N]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1400-1403.
- [8] MIHOUB M, el MAY A, ALOUI A, et al. Effects of static magnetic fields on growth and membrane lipid composition of *Salmonella typhimurium* wild-type and dam mutant strains[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 157(2): 259-266.
- [9] 夏熹, 胡常红, 王权. 静磁场对口腔嗜酸乳杆菌生长影响体外实验[J]. 重庆医科大学学报, 2010, 35(6): 908-910.
- [10] 吴智艳, 马立芝, 徐海波. 几种常见细菌受磁场作用后的生理生化反应[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(18): 28-29.
- [11] 邵伟, 熊泽, 黎妹华, 等. 磁场对大肠杆菌生长影响的研究[J]. 微生物学通报, 2000, 27(2): 112-114.
- [12] NOVÁK J L, STRASÁK L, FOJT L, et al. Effects of low-frequency magnetic fields on the viability of yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Bioelectrochemistry, 2007, 70(1): 115-121.
- [13] 靳峰, 刘陶, 李发荣, 等. 静磁场处理液体培养基对三种需氧菌生长的影响[J]. 生物医学工程学杂志, 2009, 26(4): 757-760.
- [14] FOJT L, Klapetek P, STRASAK L, et al. 50Hz magnetic field effect on the morphology of bacteria[J]. Micron, 2009, 40(8): 918-922.
- [15] JI W, HUANG H, DENG A, et al. Effects of static magnetic fields on *Escherichia coli*[J]. Micron, 2009, 40(8): 894-898.
- [16] ISHIZAKI Y, HORIUCHI S, OKUNO K, et al. Twelve hours exposure to inhomogeneous high magnetic field after logarithmic growth phase is sufficient for drastic suppression of *Escherichia coli* death[J]. Bioelectrochemistry, 2001, 54(2): 101-105.
- [17] 尹焕才, 薛小平, 谢玉为, 等. 静态强磁场对枯草芽孢杆菌的影响研究[J]. 现代生物医学进展, 2008, 8(3): 471-474.
- [18] 许喜林, 郭祀远, 李琳. 磁场对酵母菌的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(1): 41-43.
- [19] 高梦祥, 王春萍. 交变磁场对草莓保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(1): 155-158.
- [20] PATRAS A, TIWARI B, BRUNTON N, et al. Modelling the effect of different sterilisation treatments on antioxidant activity and colour of carrot slices during storage[J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 484-491.
- [21] PATRAS A, BRUNTON N P, O' DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(1): 3-11.
- [22] RAWSON A, KOIDIS A, RAI D K, et al. Influence of sous vide and water immersion processing on polyacetylene content and instrumental color of parsnip (*Pastinaca sativa*) disks[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(13): 7740-7747.
- [23] HAILE M, PAN Z, GAO M, et al. Efficacy in microbial sterilization of pulsed magnetic field treatment[J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(4): 1-14.
- [24] 杨巧绒, 高梦祥, 马海乐. 强脉冲磁场的杀菌效果及对食品品质的影响[J]. 微波学报, 2004, 20(3): 82-85.
- [25] 金江涛, 郑必胜. 强脉冲磁场对草莓汁的杀菌效果研究[J]. 食品工业, 2009(6): 022.
- [26] 郭丹丹, 肖凯军. 高强度脉冲磁场对牛奶杀菌的研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(7): 42-45.
- [27] 伊藤达弥, 铃木雅史, 吉村昇. 外加磁场对清酒7号酵母的杀菌作用[J]. 发酵工学会志(日), 1992, 70(3): 199-203.
- [28] 邓玉林, 马海乐, 储金宇. 食品电磁杀菌的原理及研究进展[J]. 食品工程, 2002(4): 47-49.
- [29] 马海乐, 邓玉林, 储金宇. 生啤酒的磁激发脉冲电磁场杀菌的试验研究[J]. 食品科学, 2003, 24(4): 52-55.
- [30] 马海乐, 邓玉林, 储金宇. 西瓜汁的高强度脉冲磁场杀菌试验研究及杀菌机理分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 163-166.
- [31] 骆新峥, 马海乐, 高梦祥. 脉冲磁场杀菌机理分析[J]. 食品科技, 2004(4): 11-13.
- [32] 骆新峥, 马海乐, 高梦祥. 牛初乳脉冲磁场杀菌试验[J]. 中国乳品工业, 2004, 32(8): 22-23.
- [33] 高梦祥, 马海乐, 郭康权. 脉冲磁场杀菌在牛奶杀菌中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2004, 4(7): 76-80.
- [34] 杨巧绒, 高梦祥, 马海乐. 强脉冲磁场的杀菌效果及对食品品质的影响[J]. 微波学报, 2004, 20(3): 82-85.
- [35] 王合利, 马海乐, 祝子坪, 等. 大肠杆菌的脉冲磁场杀菌效果及规律性的研究[J]. 食品工业科技, 2008(7): 79-81.
- [36] 朱春梅, 马海乐, 任瑞, 等. 高强度脉冲磁场对酵母菌、金黄色葡萄球菌的杀灭效果[J]. 食品工业, 2008(5): 59-61.
- [37] 马海乐, 何荣海, 邓玉林, 等. 高强度脉冲磁场杀菌出现的一种重要现象: 窗效应[C]//中国食品科学技术学会第六届年会暨第五届东西方食品业高层论坛论文摘要集, 2009: 197-198.
- [38] 许审时, 马海乐. 金黄色葡萄球菌脉冲磁场杀菌实验、生物学窗效应及其失活动力学[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 20-23.
- [39] 钱静亚, 陈超, 王晨燕, 等. 介质参数对脉冲磁场杀灭枯草芽孢杆菌的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 8-11.
- [40] 王式媛, 刘松. 平菇磁处理效应研究[J]. 辽宁农业科学, 1997(3): 28-29.
- [41] 徐忠传, 冀宏, 陈元彬, 等. 磁处理对食用菌菌丝生长的生物学效应研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7): 2932-2934.
- [42] 张宾, 马敏. 电磁场处理对凤尾菇生长效应的影响[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 296-299.
- [43] 刘善勇, 董霞. 微磁场对金针菇生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2013(4): 159-161.
- [44] 高梦祥, 夏帆, 朱朋涛. 交变磁场对猴头菌生长及胞外多糖的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 139-141; 90.
- [45] 邓光武, 夏帆, 王洁雅, 等. 低频交变磁场对红曲霉固态发酵生物量的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 128-132.
- [46] 张海英. 磁处理对蛹虫草胞外多糖的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19294-19297.
- [47] TENUZZO B, CHIONNA A, PANZARINI E, et al. Biological effects of 6 mT static magnetic fields: a comparative study in different cell types[J]. Bioelectromagnetics, 2006, 27(7): 560-577.
- [48] 马海乐, 许审时, 何荣海, 等. 利用Fura-2/AM荧光探针法和LCSM法研究受磁场处理 *S.aureus* 细胞 Ca^{2+} 的跨膜行为[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 408-410.
- [49] TRIAMPO W G, DOUNGCHAWEE D, TRIAMPO D, et al. Effects of static magnetic field on growth of leptospire, *Leptospira interrogans* serovar canicola: immunoreactivity and cell division[J]. Journal of bioscience and bioengineering, 2004, 98(3): 182-186.
- [50] 祝建, 刘歆, 钟季康, 等. 极低频电磁场对植物及人体细胞生长的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(7): 1138-1142.
- [51] PHILLIPS J N, SINGH N P, LAI H. Electromagnetic fields and DNA damage[J]. Pathophysiology, 2009, 16(2): 79-88.
- [52] 李刚, 李丹丹, 李媛媛, 等. 不同强度工频磁场对皮层神经元瞬时外向钾离子通道的影响[J]. 生物化学与生物物理进展, 2011, 38(11): 1036-1042.
- [53] RAN J, JIA S, LIU Y, et al. Characterization of cellulase under various intensities of static magnetic fields[J]. Catalysis Communications, 2009, 11(2): 91-95.