

好氧固态发酵的研究现状与展望

Present situation and future prospect of aerobic solid-state fermentation

刘敬然 李冠华

LIU Jing-ran LI Guan-hua

(内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

(College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China)

摘要:好氧固态发酵历史悠久,在人类社会发挥着重要作用。文章介绍好氧固态发酵发展史,优越性及应用领域;综述好氧固态发酵反应器及其辅助技术的研究概况与进展,并对其发展趋势进行展望。

关键词:好氧固态发酵;反应器;辅助技术

Abstract: Aerobic solid-state fermentation, with a long history, has played a pivotal role in human society. In this paper the development history, the advantages and the application fields of aerobic solid-state fermentation were introduced. Moreover, the recent research achievements of solid state fermentation bio-reactor and other auxiliary technologies were summarized. In end of the paper, the future development of aerobic solid-state was also prospected.

Keywords: aerobic solid-state fermentation; bioreactor; auxiliary technology

随着人类节能、环保意识逐渐增强,以及液态发酵高耗水、高污染的问题逐渐显现,固态发酵以其优越性引起学者们极大兴趣,但相比于液态发酵,好氧固态发酵还处于实验室研究阶段,产业化进程缓慢,在固态发酵反应器的设计与放大,发酵过程的调控与强化等方面仍有很多科学问题有待解决,因此进一步设计与完善固态发酵生物反应器及其辅助技术具有重要意义。本文详细介绍了好氧固态发酵反应器和固态发酵辅助技术的特点,应用瓶颈以及最新研究概况。

1 好氧固态发酵简介

1.1 好氧固态发酵发展史

好氧固态发酵是指有氧条件下,微生物在没有或几乎没有自由水的基质上进行的生化反应过程。由固态基质、液态水、含氧空气和微生物 4 部分组成。好氧固态发酵研究应用

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(编号:2015BS0201);内蒙古大学 2014 年博士引进科研启动经费(编号:21400-5145138)

作者简介:刘敬然,女,内蒙古大学在读本科生。

通讯作者:李冠华(1984—),男,内蒙古大学讲师,博士。

E-mail: liguanhua1984@126.com

收稿日期:2016-01-03

历史悠久。原始采摘经济时期,人类观察到自然好氧固态发酵现象并加以应用;农业经济时期好氧固态发酵被用于食物加工生产如制曲,中药炮制等;工业经济时期,发酵产品也从传统食品领域扩展到了抗生素、酶制剂、有机酸等,出现各式反应器,但此时液态发酵迅速发展,好氧固态发酵被边缘化。生态循环经济时期好氧固态发酵以其独特优越性再次受到关注,固态发酵理论进一步发展^{[1]-2}。

1.2 固态发酵优越性

表 1 从发酵体系、发酵过程、发酵微生物、发酵设备等方面详细比较了固态发酵与液态发酵的特点。由表 1 可知,固态发酵以固态基质为主体,几乎无自由水,且发酵废水排放少;模拟微生物自然环境,微生物与氧气直接接触,更适于生长,具有更高的生物量;产物附着于基质,避免反馈抑制,得率更高。

1.3 好氧固态发酵应用

好氧固态发酵在茶叶^[2]、烟草^[3]、抗生素^[4]、中药^[5]、酶制剂^[6]和化工产品^[7]等领域得到广泛应用,近年来逐步扩大到生物农药^[8]、生物修复^[9]、生物防治^[10]、生物能源^[11]等(图 1)。

表 1 固态发酵与液态发酵的比较^{[1]-5}

Table 1 The detailed comparisons between solid state fermentation and submerged fermentation

发酵类型	发酵体系	发酵培养基	微生物	发酵过程	发酵产品
固态发酵	固、液、气三相,固相占总体系 15%以上,氧气以自由氧形式存在	源于农林废弃物,分布广,价格低,营养丰富	菌群或纯菌,附着基质生长	难以控制,自动化程度低,在线检测困难	浓度高,得率高
液态发酵	固、液、气三相,固相占总体系 15%以上,氧气以溶解氧形式存在	合成培养基,价格贵,成分单一	纯菌株,悬浮培养基中生长	易于控制,自动化程度高,易于在线检测	浓度低,得率低

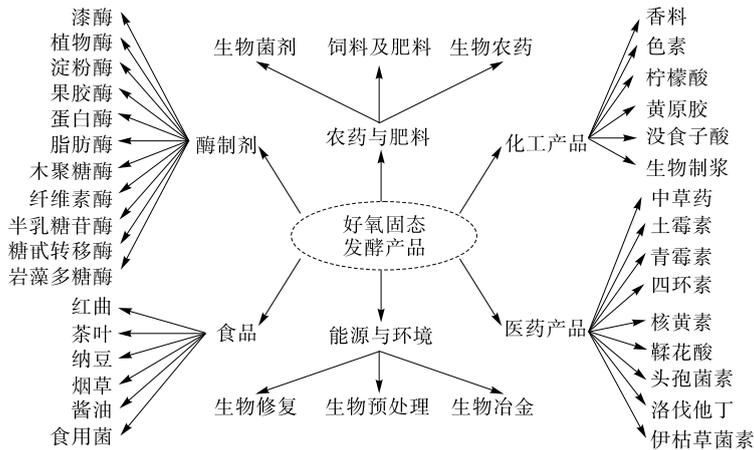


图1 好氧固态发酵产品

Figure 1 Products by aerobic solid-state fermentation

2 固态发酵反应器

反应器设计与放大是好氧固态发酵研究主要方面。根据通风与搅拌方式不同,好氧固态发酵反应器分为浅盘型、填充床型、转鼓型、气相双动态型、气固流化床型^[12]。

2.1 浅盘型好氧固态发酵反应器

浅盘型好氧固态发酵反应器主体是木、竹、塑料或钢制具有一定高度的浅盘,没有搅拌,气体自然循环。具有结构简单,易于操作等优点,是目前应用最广的好氧固态发酵反应器,特别是对于发展中国家具有重要的经济和社会效益。水分散失是影响浅盘型反应器发酵效率和放大的重要因素。Dey等^[13]开发了双层浅盘型反应器,上层托盘放固态基质,为发酵主体,下层托盘放置液体培养基,无菌空气从下层托盘进入,与液态培养基接触后进上层托盘,气体循环的同时实现营养和水分的在线实时补充。Pouryafar等^[14]开发了3层浅盘型反应器,与前者类似,第1、2层浅盘加入固态基质发酵产酶,第3层加入液态培养基以控制水分含量,相比于锥形瓶发酵,第1、2层浅盘产酶量分别提高142%和138%。Müller等^[15]开发出滴流床浅盘反应器,惰性载体为固态基质,滴流补水,液态培养基与固态基质形成特殊水膜结构。薄水膜减少营养和氧气传递距离,强化传质,产酶量提高40%。Zhang等^[16]开发出新型塑料网格托盘生物反应器,发酵托盘顶部和底部覆盖一定孔隙率的聚乙烯膜保持水分,中试试验表明产孢率是传统发酵方式的200%。

2.2 填充床型好氧固态发酵反应器

填充床型好氧固态发酵反应器包括圆柱形反应桶、带孔圆形托盘、气体进出系统三部分。发酵基质填充到反应器中,由托盘托住,无菌空气从反应器底部或顶部进入实现气体循环。反应过程无机械搅拌,通过空气流动和水分蒸发实现温度的控制。Piedrahita-Aguirre等^[4]利用填充床型反应器生产枯草菌素,其产量达到6.88 g/kg。Castro等^[6]成功应用2.3 L填充床型反应器生产淀粉酶、纤维素酶、半纤维素酶和酯酶。Kumar等^[17]成功开发1 200 L规模的填充床型

反应器,并用于洛伐他汀生产。更大的填料高度意味着更大的反应器利用效率,但填料高度超过一定值时会显著影响空气循环同时产生温度梯度,而加大空气流速又会造成固态基质水分散失,这成为制约填充床型反应器应用的重要瓶颈。开发多层填充床及多层冷却技术是解决上述问题的途径之一。Lu等^[7]设计了一个包含多个带孔托盘的填充床型反应器生产柠檬酸,每一层均可视作单独反应器进行发酵检测与控制。Mitchell等^[18]改进了多层填充床型反应器,气体从底部通入,每隔一段时间将一个料层由顶部放入反应器,同时从底部取走一个,如此往复循环,数学模拟与试验结果表明该方法可显著提高反应热去除效率。固态基质理化性质也是重要影响因素,颗粒大小、气体流速、装填密度三者相互作用,彼此影响^[19]。Pitol等^[20]开发出200 L中试级填充床型反应器,通过优化甘蔗渣与麸皮配比和气体流速,反应器内部温度维持在24~32℃,果胶酶产量达到1 840 U/(kg·h)。

2.3 转鼓型好氧固态发酵反应器

转鼓型好氧固态发酵反应器包括一个水平或倾斜圆柱桶和搅拌系统,气体自然循环或强制通风,水浴夹套控制发酵温度。转鼓型反应器是目前研究最多,最具规模化应用前景的反应器。但机械搅拌能耗较高,且造成菌体损伤和固态基质结团,制约了其应用。Schutyser等^[21]模拟了无搅拌桨、竖直搅拌桨、曲线搅拌桨3种发酵方式径向和轴向基质混合与温度梯度规律,结果表明曲线搅拌桨可有效提高发酵过程中纵向和轴向的热量传递效率,减小温度梯度。Foldman等^[22]研制了一个50 mL规模的转鼓型生物反应器,通过减小机械搅拌频率,增大通气速率,建立二者最优组合避免菌体的机械损伤,孢子萌发率提高10倍。Zhang等^[23]在搅拌轴上设置喷头强化发酵过程中的固态基质、液态水、氧气传递,实现醇均一性。Rodriguez-Jasso等^[24]开发出由6个50 mL独立丙烯圆柱桶组成的转鼓型好氧固态发酵反应器,放大18 L中式级,岩藻多糖酶产量是静置发酵的2.5倍。

2.4 气相双动态型固态发酵生物反应器

气相双动态固态发酵生物反应器包括反应器和周期气

体循环系统。密闭耐压反应器中周期性通入无菌空气, 维压后快速卸压, 及发酵罐内部气体内循环。一个周期由充压时间、高压稳定时间、泻压时间及谷压稳定时间四阶段组成^{[1]181-182}。充压及高压阶段, 固态基质受到挤压, 使菌体与基质充分接触; 瞬间泄压, 物料得以快速散开, 形成机械剪切作用。与填充床式反应器相比, 周期性的冲压与泄压作用避免了由于连续通风引起的固态基质水分损失; 与转鼓式反应器相比, 以法相作用力替代剪切力, 能耗更低, 对菌体破坏更小, 双动态形成的高压与常压变化对菌体具有周期性刺激作用。He 等^[25] 开发出 800 L 气相双动态固态发酵反应器, 并将其用于果胶酶、淀粉酶、酯酶和纤维素酶的生产, 相比于传统浅盘发酵, 酶产量提高 2 倍以上, 且发酵周期显著缩短。Chen 等^[26] 研究表明不同阶段固态发酵产热不同, 气相双动态可以促进热传递, 减少料层间温度差异; 实现微生物同步代谢, 促进代谢产物均匀分布, 菌体生长均衡^[27]; 改变细胞膜渗透性, 提高 ATP 酶活力, 促进菌体生长代谢^[28]。

2.5 气固流化床型好氧固态发酵反应器

气固流化床型好氧固态发酵反应器和填充床型好氧固态发酵反应器结构类似, 均由圆柱形反应桶、旋转浅盘和强制通风装置构成, 差别在于前者底部通入足够流速气体, 固体基质被气体吹起, 呈现“沸腾”状态。Cen 等^[29] 研究认为利用气固流化床反应器可以显著提高纤维素酶产量。气固流化床型可有效解决固态发酵均一性差的难题, 但强制通风引起水分损失。Kalogeris 等^[30] 设计了 1.6 L 气固流化床反应器, 底部设置空气分布板, 顶部设置自动滴水系统, 通过改变通气速度和滴水速度, 实现发酵过程中水分和热量的均衡分布。相对而言, 气固流化床固态发酵反应器研究较少, 但更是未来发展的重要趋势^[31]。

3 好氧固态发酵辅助技术

3.1 固态基质预处理技术

固态基质是固态发酵的核心, 为微生物生长提供碳源、氮源、诱导物和微环境; 影响着发酵热、质传递, 微生物对营养物质利用, 产物得率。固态基质的预处理是固态发酵的一个关键问题, 拥有悠久研究应用历史, 如中国传统酿酒、酿醋工艺中对物料的蒸煮就是一个典型的水热预处理技术。依据不同的固态基质采用不同的预处理技术, 改变基质理化特性, 提高发酵效率。根据是否被微生物利用, 固态基质可以分为营养固态基质和惰性固态基质, 前者同时为微生物提供营养和微环境, 而后者仅提供微环境。营养型固态基质来自以秸秆为代表的农林废弃物, 来源广, 营养丰富, 成本低。但营养型固态基质的天然理化特性并不适合微生物生长。通过预处理改变固态基质特性, 促进固态发酵是当前研究热点之一。Brijwani 等^[32] 研究发现稀酸预处理可以改变豆壳结晶度和孔隙率, 并显著增加纤维素酶活力和产量。Li 等^[33] 研究表明固态基质经汽爆预处理后表面致密结构受到破坏, 孔径变大, 可降解性显著提高, 且强化了微生物与固态基质的相互作用, 提高了微生物固态基质利用率。Rahnama 等^[34] 研究了固态基质结晶度对纤维素酶产量的影响, 结果

表明固态基质结晶度与纤维素酶产量呈负相关, 高结晶度固态基质可诱导菌体产酶。

固态基质预处理技术研究相对较少, 但所有固态基质发酵前都需要经过灭菌, 高温和高压作用会使固态基质理化性质发生变化。Zhao 等^[35] 建立了气爆灭菌法, 相比于传统灭菌方式(121 °C, 20 min)气爆灭菌时间缩短 69.8%, 固态基质理化性质发生显著变化, 葡萄糖和木糖含量分别提高 157% 和 93%, *Bacillus subtilis* 发酵能力提高 183%。

3.2 好氧混菌固态发酵技术

微生物纯培养技术建立前, 所有发酵都是混菌发酵, 而自然界的固态发酵本质也是混菌发酵。目前混菌发酵主要见于厌氧发酵, 好氧混菌固态发酵报道较少。自然界某一化合物的降解与合成往往是多个微生物共同参与的结果, 微生物根据各自理化特性选用底物作为营养, 提高固态基质利用效率。另一方面微生物细胞通过直接接触或分子信号传递信息, 相互作用, 形成互生、共生等。因此研究好氧混菌发酵有助于提高固态基质利用率和产品转化率, 产生出新的更具应用价值的发酵产物, 更好地为人类服务。*Trichoderma reesei* 和 *Aspergillus fumigatus* 混菌固态发酵生产薯蓣皂苷元产量显著优于单菌株产量^[36]。*Bacillus subtilis* 和 *Lactobacillus delbruecki* 混菌固态发酵产物具有更好的抗氧化作用^[37]。*Trichoderma reesei* 和 *Aspergillus oryzae* 混菌产生复杂的纤维素酶系统更有利于纤维素水解^[38]。*Penicillium oxalicum* 和 *Pleurotus ostreatus* 混菌发酵生产木聚糖酶和漆酶混合物, 可直用于纸浆漂白, 木聚糖酶降解半纤维素, 漆酶氧化改性木质素, 2 种酶协同作用显著除去纸浆中的木质素, 提高纸浆白度^[39]。好氧混菌发酵多集中于两菌种间相互作用, 而对于更有意义的多菌种协同作用研究仍有待加强。

3.3 好氧固态发酵周期刺激技术

磁周期刺激好氧固态发酵反应器是将磁场引入到固态发酵反应器中, 利用周期性磁场刺激微生物生长。研究^[40] 表明磁周期刺激可使菊粉酶产量提高 30%。磁场强度和作用时间是影响 *Monascus purpureus* 固态发酵产色素的重要因素, 菌体生长中后期接受低频磁场有助于色素生产, 相比于对照组黄色素和红色素产量分别提高 65.4% 和 59.2%^[41]。磁周期刺激可能改变生物分子的物理状态, 生化反应, 化学键的结合, 改变生物膜表面信号传导, 离子运输, 细胞膜上离子通道渗透性, 碳水化合物代谢等^[42], 但机理研究有待深入。

3.4 好氧固态发酵在线监测技术

微生物生长进入固态基质内部, 无法直接测得生物量, 目前多采用间接法测定, 如麦角固醇法、氨基葡萄糖法、核酸法等^[43]。上述方法测定步骤繁琐, 且只能离线测量, 难以实时监测。近红外光谱技术, 是近年来出现的在线监测技术, 通过构建数学模型, 可以准确测定底物含量、生物量、含水量、pH 值以及代谢产物浓度等。Jiang 等^[44] 基于近红外检测与区间二乘法建立了固态发酵近红外在线检测技术, 实现

了含水量和 pH 值的在线监测。Chen 等^[27]建立了生物量、代谢产物含量的近红外在线监测技术。但近红外设备价格昂贵,使其在工业化应用方面受到限制。电子鼻和电子舌是一种数字传感器,可以将化学信号转化为电信号,最终转化为数字信号,已应用于白酒、乳清蛋白实时在线监测^[45]。Duan 等^[46]基于分形维数方法使固态基质和菌丝体形态数字化,构建数学模型,通过数码照片分型维数的变化,表征生物量及产物生成量变化。吴晓强等^[47]提出一种普洱茶发酵车间温度预测方法,采用最小二乘法对车间温度进行拟合,通过数学模型实现自动化车间温度在线监测。

4 展望

好氧固态发酵历史悠久,与人类关系密切。虽然产业化发展相对缓慢,但因其独特优越性,随着固态发酵理论研究的不断深入,固态发酵反应器的不断创新与完善和各种新技术的不断应用,好氧固态发酵必将在人类生活发挥重要作用。未来将会在基于“大数据”的发酵过程模拟与优化、基于发酵过程的固态基质预处理、基于菌群特性的周期刺激、基于产品的混菌发酵体系的建立与调控、基于现代控制技术的反应器设计与开发等方面取得更多突破。

参考文献

[1] CHEN Hong-zhang. Modern solid state fermentation [M]. Berlin: Springer, 2013.

[2] 黄云战, 赵永杰, 李丽雅, 等. 普洱茶发酵罐研制及应用进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 115-118.

[3] 王洁, 曾代龙, 符雷, 等. 晾晒烟叶发酵研究进展[J]. 河南农业科学, 2014, 43(4): 1-4.

[4] PIEDRAHÍTA-AGUIRRE C A, ALEGRE R M. Production of lipopeptide iturin: a using novel strain *Bacillus iso 1* in a packed bed bioreactor[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, 3(2): 154-158.

[5] 秦晓喻, 李冠华. 固态发酵炮制中药材研究进展[J]. 中药材, 2016, 39(3): 691-695.

[6] CASTRO A M, CASTILHO L R, FREIRE D M G. Performance of a fixed-bed solid-state fermentation bioreactor with forced aeration for the production of hydrolases by *Aspergillus awamori*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 93: 303-308.

[7] LU M Y, MADDOX I S, BROOKS J D. Application of a multi-layer packed-bed reactor to citric acid production in solid-state fermentation using *Aspergillus niger*[J]. Process Biochemistry, 1998, 33(2): 117-123.

[8] ZHANG Wei-wei, QIU Li-na, GONG Ai-jun, et al. Solid-state Fermentation of Kitchen Waste for Production of *Bacillus thuringiensis*-based Bio-pesticide[J]. BioResources, 2013, 8(1): 1 124-1 135.

[9] KADAM A A, KAMATKAR J D, KHANDARE R V, et al. Solid-state fermentation: tool for bioremediation of adsorbed textile dyestuff on distillery industry waste-yeast biomass using isolated *Bacillus cereus* strain EBT1[J]. Environmental Science

and Pollution Research, 2013, 20(2): 1 009-1 020.

[10] KRUGER R D, POSADAS J B, LEWYLLE M A, et al. Solid Substrate Production and Formulation of an Isolate of *Metarhizium anisopliae* for Biological Control of Stem Bug *Tibraca limbativentris*[J]. World Applied Sciences Journal, 2014, 32(7): 1 242-1 251.

[11] SHI Jian, GEORGE K W, SUN Ning, et al. Impact of pre-treatment technologies on saccharification and isopentenol fermentation of mixed lignocellulosic feedstocks[J]. BioEnergy Research, 2015, 8(3): 1 004-1 013.

[12] THOMAS L, LARROCHE C, PANDEY A. Current developments in solid-state fermentation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 81: 146-161.

[13] DEY T B, BANERJEE R. Hyperactive α -amylase production by *Aspergillus oryzae* IFO 30103 in a new bioreactor[J]. Letters in Applied Microbiology, 2012, 54(2): 102-107.

[14] POURYAFAR F, NAJAFPOUR G, JAHANSHAHI M. Comparative studies of alkaline protease production in solid state fermentation: tray bioreactor and flask[J]. Pakistan Journal of Biotechnology, 2015, 12(1): 7-13.

[15] MÜLLER M, PRADE R A, SEGATO F, et al. Continuous xylanase production with *Aspergillus nidulans* under pyridoxine limitation using a trickle bed reactor[J]. Bioresource Technology, 2015, 188: 219-225.

[16] ZHANG Yuan-yuan, GAO Xin, LIU Jun-hong, et al. Pilot production of *Clonostachys rosea* conidia in a solid-state fermentor optimized using response surface methodology[J]. Engineering in Life Sciences, 2015, DOI: 10.1002/elsc.201400260.

[17] KUMAR S, SRIVASTAVA N, GUPTA B S, et al. Lovastatin production by *Aspergillus terreus* using lignocellulose biomass in large scale packed bed reactor[J]. Food and Bioproducts Processing, 2014, 92(4): 416-424.

[18] MITCHELL D A, CUNHA L E N, MACHADO A V L, et al. A model-based investigation of the potential advantages of multi-layer packed beds in solid-state fermentation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 48(2): 195-203.

[19] 董吉林, 杜冰, 申瑞玲. 填充床固态发酵生物反应器模拟研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 258-261.

[20] PITOL L O, BIZ A, MALLMANN E, et al. Production of pectinases by solid-state fermentation in a pilot-scale packed-bed bioreactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 1 009-1 018.

[21] SCHUTYSER M A I, WEBER F J, BRIELS W J, et al. Three-dimensional simulation of grain mixing in three different rotating drum designs for solid-state fermentation[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2002, 79(3): 284-294.

[22] FLODMAN H R, NOUREDDINI H. Effects of intermittent mechanical mixing on solid-state fermentation of wet corn distillers grain with *Trichoderma reesei*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 81: 24-28.

[23] ZHANG Qing-hua, WANG Zhi-hui, WEN Shu-mei, et al. Gas-liquid mass transfer characteristics in a rotating-drum

- bioreactor[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2012, 35(10): 1 842-1 848.
- [24] RODRÍGUEZ-JASSO R M, MUSSATTO S I, SEPÚLVEDA L, et al. Fungal fucoidanase production by solid-state fermentation in a rotating drum bioreactor using algal biomass as substrate[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(4): 587-594.
- [25] HE Qin, CHEN Hong-zhang. Pilot-scale gas double-dynamic solid-state fermentation for the production of industrial enzymes [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(10): 2 916-2 924.
- [26] ZHAO Zhi-min, WANG Lan, CHEN Hong-zhang. Variable pressure pulsation frequency optimization in gas double-dynamic solid-state fermentation (GDSSF) based on heat balance model [J]. *Process Biochemistry*, 2015, 50(2): 157-164.
- [27] CHEN Hong-zhang, ZHAO Zhi-min, LI Hong-qiang. The effect of gas double-dynamic on mass distribution in solid-state fermentation[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2014, 58: 14-21.
- [28] CHEN Hong-zhang, SHAO Mei-xue, LI Hong-qiang. Effects of gas periodic stimulation on key enzyme activity in gas double-dynamic solid state fermentation (GDD-SSF)[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2014, 56: 35-39.
- [29] CEN Pei-lin, XIA Li-ming. Production of cellulase by solid-state fermentation[M]. Berlin: Springer, 1999: 65, 69-92.
- [30] KALOGERIS E, INIOTAKI F, TOPAKAS E, et al. Performance of an intermittent agitation rotating drum type bioreactor for solid-state fermentation of wheat straw[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(3): 207-213.
- [31] YOON L W, ANG T N, NGOH G C, et al. Fungal solid-state fermentation and various methods of enhancement in cellulase production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 67: 319-338.
- [32] BRIJWANI K, VADLANI P V. Cellulolytic enzymes production via solid-state fermentation; effect of pretreatment methods on physicochemical characteristics of substrate[J]. *Enzyme Research*, 2011(2 011): 1-10.
- [33] LI Guan-hua, CHEN Hong-zhang. Synergistic mechanism of steam explosion combined with fungal treatment by *Phellinus baumii* for the pretreatment of corn stalk[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 67: 1-7.
- [34] RAHNAMA N, MAMAT S, SHAH U K M, et al. Effect of alkali pretreatment of rice straw on cellulase and xylanase production by local *Trichoderma harzianum* SNRS3 under solid state fermentation[J]. *Bioresources*, 2013, 8(2): 2 881-2 896.
- [35] ZHAO Zhi-min, WANG Lan, CHEN Hong-zhang. A novel steam explosion sterilization improving solid-state fermentation performance[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 547-555.
- [36] CHENG Yu-tong, DONG Chun, HUANG Cheng-cai, et al. Enhanced production of diosgenin from *Dioscorea zingiberensis* in mixed culture solid state fermentation with *Trichoderma reesei* and *Aspergillus fumigatus*[J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2015, 29(4): 773-778.
- [37] JHAN J K, CHANG Wei-fen, WANG Pei-ming, et al. Production of fermented red beans with multiple bioactivities using co-cultures of *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 1 281-1 287.
- [39] BRIJWANI K, OBEROI H S, VADLANI P V. Production of a cellulolytic enzyme system in mixed-culture solid-state fermentation of soybean hulls supplemented with wheat bran [J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(1): 120-128.
- [40] DWIVEDI P, VIVEKANAND V, PAREEK N, et al. Bleach enhancement of mixed wood pulp by xylanase-laccase concoction derived through co-culture strategy[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 160(1): 255-268.
- [40] CANLI O, KURBANOGLU E B. Application of low magnetic field on inulinase production by *Geotrichum candidum* under solid state fermentation using leek as substrate[J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2011, 28(2 012): 894-990.
- [41] ZHANG Jia-lan, ZENG Dong-jie, Xu Cui, et al. Effect of low-frequency magnetic field on formation of pigments of *Monascus purpureus* [J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 240(3): 577-582.
- [42] PICHKO V B, POVALYAEVA I V. Electromagnetic stimulation of microorganism productivity; possible mechanisms[J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 1996, 32(4): 425-428.
- [43] 魏培莲, 岑沛霖, 盛春琦. 3种固态发酵生物量测定方法的比较 [J]. *食品与生物技术学报*, 2006, 25(1): 60-64.
- [44] JIANG Hui, LIU Guo-hai, MEI Cong-li, et al. Measurement of process variables in solid-state fermentation of wheat straw using FT-NIR spectroscopy and synergy interval PLS algorithm [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2012, 97: 277-283.
- [45] PERIS M, ESCUDER-GILABERT L. On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 804: 29-36.
- [46] DUAN Ying-yi, WANG Lan, CHEN Hong-zhang. Digital image analysis and fractal-based kinetic modelling for fungal biomass determination in solid-state fermentation [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, 67: 60-67.
- [47] 吴晓强, 黄云战, 周红杰, 等. 普洱茶发酵车间环境温度的预测方法[J]. *食品与机械*, 2014, 30(4): 7-10.