

加热不燃烧卷烟产品主流烟气中香味成分的比较

Comparative analysis of the aroma components in mainstream aerosol of heat-not-burn tobacco products

王颖¹ 杨文彬² 王冲¹ 陈嘉彬¹

WANG Ying¹ YANG Wen-bin² WANG Chong¹ CHEN Jia-bin¹

李剑政² 谢涛¹ 吉雄¹

LI Jian-zheng² XIE Tao¹ JI Xiong¹

(1. 深圳烟草工业有限责任公司, 广东 深圳 518109; 2. 深圳波顿香料有限公司, 广东 深圳 518055)

(1. Shenzhen Tobacco Industry Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518109, China;

2. Shenzhen Boton Flavors & Fragrances Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518055, China)

摘要:为考察加热不燃烧卷烟产品的香味成分释放情况,对市场占有率较高的3款产品进行抽吸,并采用GC/MS对主流烟气中的香味成分进行了分析,结果表明:①3款产品抽吸时单位口数下酸性香味成分的释放量相对较低,中性及碱性香味成分释放量相对较高;②各产品单位口数下的香味成分释放总量为I>L>G;③与传统卷烟的典型香味成分比较,加热不燃烧卷烟烟气中来源于烟草本身的香气质及香气量均较低,且在烤烟型传统卷烟的特征香韵方面比较薄弱,可通过向烟支原料中增加烟草提取物,或者添加具有烘焙香、烟熏香味的香精香料加以改善。

关键词:加热不燃烧卷烟;主流烟气;香味成分;传统卷烟

Abstract: In order to investigate the release characteristics of aroma components in mainstream aerosol of heat-not-burn tobacco products, three popular commercial products were smoked. The aroma components were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS). The results showed that: ① The release of neutral and basic aroma components per unit puff was higher than that of acids flavors. ② The total release of aroma components per unit puff of sample I was higher than that of sample L which was higher than that of sample G. ③ The quality and quantity of aroma components which originated from natural tobacco leaves, were lower in heat-not-burn tobacco products than in traditional ones. And that may cause a weakness in tobacco

specific flavor, which could be improved by adding tobacco extractives or smoky components in tobacco materials of heat-not-burn tobacco products.

Keywords: heat-not-burn tobacco product; mainstream aerosol; aroma components; traditional cigarettes

加热不燃烧型卷烟是一类新型烟草制品,通过特殊热源对烟丝进行加热,使其在非燃烧状态下释放出供消费者吸食的烟雾。与传统卷烟相比,这类新型卷烟的有害成分和侧流烟气释放量明显减少,因此随着全球控烟力度的持续加大,加热不燃烧型卷烟产品逐渐成为国内外烟草公司的研发热点,各类新型产品不断涌现。然而,习惯于传统卷烟风格的消费者经常表现出对加热不燃烧型卷烟感官特征的不适应,说明加热不燃烧卷烟烟气的香味组成与传统卷烟存在差异,研究其香味成分的释放情况,对产品研发及品质改善具有显著的指导意义。目前,国外烟草行业对这类新型卷烟的研究^[1-3]大多集中在评价减害效果的毒理研究方面,中国烟草行业在加快推进新型烟草制品研发创新的战略布局下,针对这类新型卷烟也开展了大量的研究工作^[4-6]。关于挥发性成分及香味成分的研究方面,杨继等^[7]通过顶空—气相色谱/质谱分析,在80~200℃范围内对比了加热不燃烧卷烟烟草材料和传统卷烟烟丝的挥发性化学成分;霍现宽等^[8]研究了不同类型及部位的烟叶原料在不同温度下香味成分的释放特征;刘达岸等^[9]从微观结构、抗张性能、烟叶及烟气化学成分等方面对比研究了不同工艺制造的加热不燃烧再造烟叶材料。以上研究工作为产品的自主研发提供了丰富的理论依据与数据支持,但这类研究多为针对原料的基础规律研究。

基金项目:中国烟草总公司科技重大专项项目[编号:110201801009(XX-09)]

作者简介:王颖(1983—),女,深圳烟草工业有限责任公司工程师,博士。E-mail: chemwangying@126.com

收稿日期:2019-02-08

为进一步了解加热非燃烧型卷烟的产品特性,本研究拟从产品的角度出发,针对国外市场占有率较高的3款产品,对其在加热状态下的烟气香味成分释放特征进行分析,并与传统卷烟典型香味成分加以对比,以期为新型卷烟的研发及品质改善提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

加热不燃烧卷烟:选取国外市场占有率较高的3款加热不燃烧卷烟产品 I、G、L 作为研究对象;

传统卷烟样品:中国市售的5个牌号烤烟型卷烟,盒标焦油均为10 mg;

二氯甲烷、正十七烷、异丙醇、无水硫酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

标准样品:纯度>97%,美国 Sigma-Aldrich 公司;

直线式吸烟机:SM405 型,英国 Cerulean 公司;

转盘式吸烟机:RM20H 型,德国 Borgwalt 公司;

滤片:44.92 mm 剑桥滤片,英国 Whatman 公司;

气相色谱—质谱联用仪:Trace GC Ultra-ISQ 型,美国 Thermofisher 公司。

1.2 方法

1.2.1 抽吸方法

(1) 加热不燃烧卷烟:将样品烟连接配套加热烟具,用直线吸烟机进行抽吸。抽吸参数为抽吸容量 35 mL,持续时间 2 s,抽吸间隔 30 s。加热烟具启动后需进行预热,预热结束后立即开始第一口抽吸,根据不同品牌的最长抽吸时间设计,固定各产品抽吸口数,各烟具主要参数及抽吸口数如表 1 所示。每轮抽吸 5 支,用 44 mm 剑桥滤片捕集样品烟主流烟气颗粒物,共抽吸 4 轮。

(2) 传统卷烟:按照 GB/T 19609—2004 的方法用转盘吸烟机进行抽吸。抽吸参数为 ISO 模式下的参数:抽吸容量 35 mL,持续时间 2 s,抽吸间隔 60 s,用 92 mm 剑桥滤片捕集 20 支卷烟的主流烟气颗粒物。

1.2.2 烟气样品的前处理方法 待烟支样品抽吸完毕,将捕集有颗粒物的滤片折起并擦净捕集器上的冷凝物后,放入锥形瓶中。对于加热不燃烧卷烟,需合并 4 张滤片。然后加入 200 μ L 1 mg/mL 正十七烷异丙醇溶液作为内标,分两次各用 50 mL 二氯甲烷萃取,振荡 30 min,静置 15 min,合并萃取液,加入 10 g 无水硫酸钠振荡静置 15 min,过滤后在 45 $^{\circ}$ C 常压下浓缩至 1 mL,取 1 μ L 滤液进行 GC/MS 分析。

1.2.3 分析方法 色谱柱:HP-INNOWAX 19091N-136 毛细管柱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m);进样口温度:250 $^{\circ}$ C;升温程序:50 $^{\circ}$ C 保持 0 min,然后以 2 $^{\circ}$ C/min 升至 250 $^{\circ}$ C 并保持 20 min;进样方式:分流进样;分流比:20:1;进样量:1 μ L;载气流速:1 mL/min。电离方式:EI

表 1 不同加热烟具的主要参数

Table 1 Parameters of different electric-heating cigarette heaters

烟具编号	电加热结构	预热时间/s	使用时间/s	状态指示	抽吸口数
I	片状	20	370	灯+震动	12
G	外围	40	210	灯+震动	8
L	针状	15	230	灯	8

源;离子源温度:230 $^{\circ}$ C;接口温度:250 $^{\circ}$ C;扫描方式:全扫描。

2 结果与分析

2.1 酸性香味成分

烟草中的多元酸和饱和脂肪酸可参与调节烟气 pH,影响卷烟的劲头和吃味,在烟气中起平衡的作用,低级不饱和脂肪酸具有焦糖的甜的香韵,芳香酸类如苯甲酸、苯乙酸则可协调烤烟型香气,增加香气丰满度。由表 2 可知,加热状态下 3 款产品的酸性香味成分释放种类是 L>I>G,从释放量来看,产品 I 的乙酸及十六酸释放量显著高于 G 和 L,因而酸性香味成分的释放总量是 I>L>G。

2.2 中性香味成分

中性香味成分是卷烟中重要的致香物质,对增强和

表 2 酸性香味成分释放量[†]

Table 2 Release of acidic aroma components

化合物名称	μ g/Cig		
	I	G	L
乙酸	8.08	1.69	4.18
丙酸	0.45	0.12	0.16
丙烯酸	0.15	—	0.06
异戊酸	0.40	—	—
2-甲基丁酸	0.32	—	0.04
3-甲基戊酸	1.05	—	0.02
己酸	—	0.14	0.10
壬酸	—	—	0.08
苯甲酸	0.04	—	0.16
十二酸	—	—	0.09
苯乙酸	0.22	—	0.15
十四酸	0.48	—	0.15
十五酸	0.25	0.12	0.09
十六酸	12.51	7.10	5.52
十七酸	0.30	0.24	0.28
十八酸	2.25	1.34	1.28
二十酸	0.25	0.11	0.10
合计	26.74	10.86	12.46

[†] “—”表示未检出。

改善卷烟的香气具有明显作用,主要包含酮类、醛类、酚类、醇类和酯类化合物。由表 3 可知,产品 I 的主流烟气中所测得的中性香味成分的种类和释放量均显著高于产品 G 和 L。其中酮类物质如茄尼酮、巨豆三烯酮、金合欢基丙酮等来源于天然烟叶中西柏烷类、类胡萝卜素的降解,烯炔类物质如新植二烯来源于烟草中叶绿素的降解^[10-11],产品 I 中这些成分的释放量显著高于产品 G 和 L,说明产品 I 的原料基质中含有较多烟草或烟草提取物。麦芽酚水合物的释放量与原料中的糖分含量有关,3 款产品的烟气中均检测到较高含量的麦芽酚水合物,可能是配方基质中含有较高糖分,乙基麦芽酚非烟草本身特有物质,在产品 G 和 L 中的存在说明其配方中可能加入了含有此成分的香甜味料液。3 款产品的烟气释放物中均检测到了较高含量的甘油、丙二醇,是因为加热不燃烧卷烟的烟草基质中通常添加较多甘油和丙二醇作为发烟剂。3 款产品的烟气中都检测到了薄荷醇,说明都采用了薄荷醇作为凉味剂,其中产品 G 的薄荷醇释放量最高。胡萝卜次醇是胡萝卜籽油的特征成分,在产品 I 的烟气中

检测到少量胡萝卜次醇,说明其基质配方中可能含有胡萝卜籽油。

2.3 碱性香味成分

加热状态下主流烟气中碱性香味成分以烟碱为主,兼有少量吡啶类、吡嗪类化合物。吡啶、吡嗪类化合物一般具有烤香、坚果香和焦糖香,对烟草的特征香味起着重要作用,生物碱类化合物如烟碱及烟碱的转化物可替宁等化学物质则在满足吸味劲头和赋予烟草生理强度方面有重要的影响^[12-13]。由表 4 可知,生物碱类化合物释放量排序为 I>L>G,其他杂环类化合物释放量排序为 I>G>L,说明 I 在吸味劲头和烟草特征香气方面整体优于 G 和 L。

2.4 香味成分单位口数下释放量的对比分析

鉴于产品 I 每支抽吸口数为 12,G、L 每支抽吸口数为 8,为更加客观比较 3 款产品香味成分释放量的差异,考察了每款产品单位口数下各类香味成分释放量的差异。差异显著性分析结果显示,酸性、中性、碱性香味成分之间存在显著差异(P=0.01),但产品之间的香味成分

表 3 中性香味成分释放量[†]
Table 3 Release of neutral aroma components μg/Cig

化合物名称	I	G	L	化合物名称	I	G	L
3-羟基-2-丁酮	0.50	0.25	0.21	薄荷醇	0.84	1.27	0.49
2-环戊烯酮	—	0.02	—	糠醇	0.49	0.65	0.37
2-甲基-2-环戊烯酮	0.15	—	0.06	1,3-丙二醇	—	—	0.05
1-羟基-2-丁酮	0.26	0.11	0.13	苯乙醇	—	0.02	—
4-环戊烯-1,3-二酮	0.10	0.16	0.05	胡萝卜次醇	0.11	—	—
茄尼酮	1.69	0.38	0.13	甘油	18.57	12.37	11.07
β-二氢大马酮	0.02	—	—	西柏烷三烯二醇	1.80	—	—
β-大马酮	0.01	—	0.05	植醇	1.52	0.52	0.20
甲基环戊烯醇酮	0.05	0.12	0.02	3-氧代-α-紫罗兰醇	1.28	—	0.15
菠萝味喃酮	0.52	0.25	0.09	α-柏木烯	0.05	—	—
六氢金合欢基丙酮	0.35	—	—	反式石竹烯	0.35	—	—
巨豆三烯酮	0.50	0.22	0.07	新植二烯	27.12	8.39	4.56
金合欢基丙酮	0.04	—	—	西柏烯	1.37	0.64	0.27
糠醛	0.76	0.86	0.23	乙酸芳樟酯	0.05	—	—
5-甲基糠醛	0.39	0.37	0.19	单乙酸丙二醇酯	0.63	0.04	0.31
5-羟甲基糠醛	1.09	1.50	0.80	十六酸甲酯	0.28	0.15	0.07
愈创木酚	—	0.09	—	十六酸乙酯	1.22	0.06	0.11
对乙基愈创木酚	0.07	0.06	—	十七酸乙酯	0.30	—	—
乙基麦芽酚	—	0.05	0.02	十八酸乙酯	0.46	—	0.05
麦芽酚水合物	6.26	2.65	3.96	油酸乙酯	0.61	—	—
丙酮醇	2.86	1.52	2.24	亚油酸乙酯	1.58	—	—
芳樟醇	0.10	—	0.01	亚麻酸乙酯	0.94	—	—
辛醇	0.13	0.18	0.12	合计	87.67	39.92	38.97
1,2-丙二醇	12.27	7.05	12.92				

† “—”表示未检出。

表 4 碱性香味成分释放量[†]

Table 4 Release of basic aroma components

化合物名称	μg/Cig		
	I	G	L
吡啶	0.29	0.09	0.11
吡嗪	0.02	—	—
2-甲基吡嗪	0.17	0.05	0.05
2,5-二甲基吡嗪	0.04	—	0.01
2,6-二甲基吡嗪	0.21	0.04	0.05
2,3-二甲基吡嗪	0.02	—	—
2-乙基-6-甲基吡嗪	0.01	—	—
三甲基吡嗪	0.01	—	—
四甲基吡嗪	—	—	0.01
烟碱	93.36	36.24	61.64
N-乙基降烟碱	—	—	0.03
N-甲基新烟碱	0.04	0.04	0.04
2-甲酰基吡咯	—	0.04	—
麦斯明	0.22	0.07	0.12
二烯烟碱	—	—	0.15
6-甲基-3-吡啶醇	0.18	—	—
3-吡啶醇	2.69	1.24	0.73
2,3-联吡啶	0.38	0.43	0.19
可替宁	0.37	0.10	0.12
生物碱类合计	93.99	36.45	62.09
其他合计	4.01	1.87	1.26
合计	98.00	38.32	63.35

† “—”表示未检出。

差异不显著(P=0.10)。由图 1 可知,3 款产品抽吸时单位口数下酸性香味成分的释放量相对较低,而中性、碱性香味成分释放量相对较高。综合来看,各产品单位口数下的香味成分释放总量为 I>L>G。

3 款产品单位口数下的香味成分释放量存在差异,可能是:① 各款产品配套烟支的配方不同;② 各款产品加热方式和加热参数不同,导致产品内部温场分布不同。产品 I 的加热器具为中心片状加热,持续加热时间约为 370 s,产品 G 的加热器具为包围两段式加热,持续加热时间约为 210 s,各品牌器具加热方式和加热参数的不同,

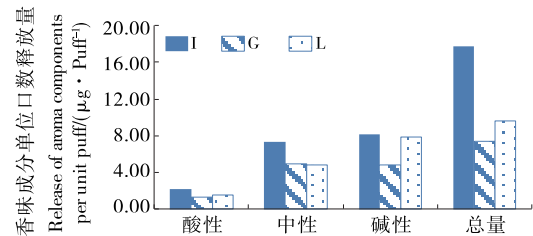


图 1 3 款产品单位口数下香味成分释放量

Figure 1 Release of aroma components per unit puff of 3 commercial products

可能导致抽吸时烟气释放物的种类和含量有所差异。

2.5 与传统卷烟典型香味成分的对比分析

为反映加热不燃烧卷烟产品与传统卷烟香味成分的差异,测定了 5 款传统卷烟主流烟气粒相物中的典型香味成分,将各成分的平均值列于表 5 中与样品 I、G、L 进行对比。结果表明,样品 I、G、L 主流烟气粒相物中不含香叶基丙酮、降茄尼二酮、二氢猕猴桃内酯等致香物质,巨豆三烯酮、糠醛、新植二烯等香气物质释放量也较低,表明这 3 款产品中来源于烟叶本身的致香物质种类较少,并且释放量较低。这主要是因为加热不燃烧卷烟的烟草基质主要是烟草薄片,可通过向薄片中添加烟草提

表 5 典型香味成分释放量[†]

Table 5 Release of typical aroma components

化合物名称	加热不燃烧卷烟			传统卷烟
	I	G	L	
愈创木酚	—	0.09	—	1.26
对乙烯基愈创木酚	—	—	—	3.39
2-环戊烯酮	—	0.02	—	1.19
茄尼酮	1.69	0.38	0.13	2.14
β-大马酮	0.01	—	0.05	0.25
香叶基丙酮	—	—	—	0.20
降茄尼二酮	—	—	—	0.89
巨豆三烯酮	0.50	0.22	0.07	6.42
糠醛	0.76	0.86	0.23	1.76
5-甲基糠醛	0.39	0.37	0.19	1.98
糠醇	0.49	0.65	0.37	3.59
西柏烷三烯二醇	1.80	—	—	2.61
植醇	1.52	0.52	0.20	0.46
3-氧代-α-紫罗兰醇	1.28	—	0.15	2.21
葫芦巴内酯	—	—	—	1.09
十六酸甲酯	0.28	0.15	0.07	2.65
二氢猕猴桃内酯	—	—	—	0.40
柠檬烯	—	—	—	5.51
新植二烯	27.12	8.39	4.56	36.19
吡啶	0.29	0.09	0.11	0.62
3-甲基吡啶	0.01	—	—	1.44
3-乙烯基吡啶	—	—	—	1.69
3-乙酰氧基吡啶	—	—	—	1.18
烟碱	93.36	36.24	61.64	162.37
喹啉	—	—	—	0.54
麦斯明	0.22	0.07	0.12	2.08
二烯烟碱	—	—	0.15	1.86
2,3-联二吡啶	0.38	0.43	0.19	2.64
可替宁	0.37	0.10	0.12	0.56

† “—”表示未检出。

取物来增加烟草本身的香气物质。此外,愈创木酚类化合物、生物碱类化合物,以及氮杂环类化合物的种类与释放量也远低于传统卷烟。因此加热不燃烧卷烟在烤烟型传统卷烟的特征香韵方面比较薄弱,可通过向烟支原料中添加具有烘焙香、烟熏香味道的香精香料加以改善。

3 结论

采用 GC/MS 分别对 3 款加热不燃烧卷烟主流烟气中的香味成分进行了鉴定,结果显示:① 3 款产品抽吸时单位口数下酸性香味成分的释放量相对较低,中性及碱性香味成分释放量相对较高;② 各产品单位口数下的香味成分释放总量为 I>L>G;③ 与传统卷烟的典型香味成分比较,加热不燃烧卷烟烟气中来源于烟草本身的香气质及香气量均较低,且在烤烟型传统卷烟的特征香韵方面比较薄弱,可通过向烟支原料中增加烟草提取物,或者添加具有烘焙香、烟熏香味道的香精香料加以改善。加热不燃烧卷烟产品与传统卷烟烟气中典型香味成分的比较,对于加热不燃烧烟草制品研发中的原料控制、配方设计、品质改善等方面具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] BOMBICK B R, MURLI H, AVALOS J T, et al. Chemical and biological studies of a new cigarette that primarily heats tobacco Part 2: In vitro toxicology of mainstream smoke condensate[J]. Food and Chemical Toxicology, 1998, 36(3): 183-190.
- [2] BOMBICK D W, AYRES P H, PUTNAM K, et al. Chemical and biological studies of a new cigarette that primarily heats tobacco Part 3: In vitro toxicity of whole smoke[J]. Food and Chemical Toxicology, 1998, 36(3): 191-197.
- [3] SCHALLER J P, KELLER D, POGET L, et al. Evaluation of the tobacco heating system 2.2 Part 2: Chemical composition, genotoxicity, cytotoxicity, and physical properties of the aerosol[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2016, 81(2): S27-S47.
- [4] 杨继, 杨帅, 段沉杏, 等. 加热不燃烧卷烟烟草材料的热分析研究[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 7-13.
- [5] 马鹏飞, 李巧灵, 林凯, 等. 加热非燃烧烟草薄片的热解特性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 71-74.
- [6] 刘珊, 唐培培, 曾世通, 等. 加热状态下烟叶烟气的释放特征[J]. 烟草科技, 2015, 48(4): 27-31.
- [7] 杨继, 汤建国, 尚膳斋, 等. 利用顶空-GC/MS 法对比新型卷烟和传统卷烟的挥发性成分[J]. 烟草科技, 2015, 48(11): 33-39.
- [8] 霍现宽, 刘珊, 崔凯, 等. 加热状态下烟草烟气香味成分释放特征[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 37-45.
- [9] 刘达岸, 李鹏飞, 刘冰, 等. 不同加热非燃烧再造烟叶特性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 26-29.
- [10] 卢乐华. 云南清香型卷烟特征香味成分剖析与鉴定[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 26.
- [11] 章伟, 李德国, 鲍辰卿, 等. β -胡萝卜素衍生物制备及在卷烟中的应用[J]. 香料香精化妆品, 2017(2): 36-39, 43.
- [12] 洪华俏, 郭紫明, 易克, 等. 卷烟主流烟气的中性和碱性香气成分分析[J]. 湖南农业科学, 2008(3): 140-142.
- [13] 杨少丽, 卓越, 唐甜. 一种具有浓郁坚果香香精的制备及其在烟草中的应用研究[J]. 香料香精化妆品, 2017(3): 13-16.
- [14] 李华, 冯凤琴, 沈立荣, 等. 淡豆豉优势菌株的鉴定及其对大豆蛋白质的分解作用[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(1): 1-6.
- [15] 黄雁萍. 油脂分解菌之分离及其降解油脂能力之探讨[D]. 台北: 中兴大学, 2012: 1-19.
- [16] 邴君妍, 罗恩华, 金宜英, 等. 中国餐厨垃圾资源化利用系统建设现状研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(4): 39-43.
- [17] 尹亚琳. 餐厨垃圾的处理技术[J]. 资源节约与环保, 2018(6): 106.
- [18] 李杨, 蔡海莺, 赵敏洁. 高产耐高温脂肪酶生产菌的筛选与鉴定[J]. 生物技术通报, 2015(1): 144-150.
- [19] VASEEKARAN S, BALAKUMAR S, ARASARATNAM V. Isolation and identification of a bacterial strain producing thermostable α -amylase [J]. Tropical Agricultural Research, 2010, 22(1): 1-11.
- [20] 张慧. 高温菌株生理生化及有机物降解性质研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010: 4-12.
- [21] 彭孝斌. 甘油—生理盐水保存菌种方法介绍[J]. 预防医学情报杂志, 2014, 30(11): 933-936.
- [22] 季敏, 章建康. 美国帕斯适宜卫生科技组织[J]. 国际生物制品学杂志, 2011, 34(4): 211-213.
- [23] 丁杰萍, 周静, 王潇, 等. 兰州城区餐厨垃圾成分分析[J]. 甘肃科技, 2018, 34(18): 57-60.
- [24] 咸芳. 餐厨垃圾高效处理复合微生物菌剂的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 17-23.
- [25] 布坎南. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组, 译. 北京: 科学出版社, 1995: 591-611.
- [26] 郑盱, 陈泽斌, 夏体渊, 等. 餐厨垃圾好氧降解菌的筛选鉴定[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 420-424.
- [27] 段怡臣. 餐厨垃圾高效生物降解菌降解效果试验研究[J]. 科学家, 2016(17): 31-32.
- [28] AUREPATIPAN N, CHAMPREDA V, KANOKRAT-ANA P, et al. Assessment of bacterial communities and activities of thermotolerant enzymes produced by bacteria indigenous to oil-bearing sandstone cores for potential application in Enhanced Oil Recovery[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 163(4): 259-302.
- [29] 荆哲华, 吴浩浩, 朱素芹, 等. 耐高温胶原蛋白酶菌株的筛选和产酶条件优化[J]. 食品科技, 2017(12): 11-17.

(上接第 58 页)