

doi:10.3969/j.issn.1005-8141.2020.12.014

圈养大熊猫选择 6 种竹秆采食的气味机理初探

鲜义坤¹, 王 慧², 李松柏³, 林俊帆⁴, 杨 进⁵, 杨 楠¹, 冯志新⁵, 包清彬⁶

(1. 四川省自然资源科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 成都大帝汉克生物科技有限公司, 四川 成都 611130; 4. 成都产品质量检验研究院有限责任公司, 四川 成都 610100;

5. 青神县农业农村局, 四川 眉山 620460; 6. 西华大学 食品与生物工程学院, 四川 成都 610039)

摘要:为了探索圈养大熊猫选择竹秆采食的气味机理,用佛肚竹、毛竹、牛儿竹、硬头黄竹、清甜竹、孝顺竹 6 种竹子的新鲜竹秆饲喂大熊猫,进行自由选择采食试验,录像记录摄食过程,经摄食行为的回放分析和样品的嗅感品评、电子鼻测试和 HS-SPME-GC-MS 测定挥发性有机物和香气成分。结果表明:圈养大熊猫嗅闻 6 种竹秆后均有不同程度的采食,6 种竹秆的气味均由多种韵调组成,共同之处在于新鲜感、青香、甜气和木质气息,不同之处在于甜气和木质气息的强度或有草香等其他微弱的韵调;电子鼻测试结果支持了竹秆间的气味差异性,挥发性有机物和香气成分分析结果证实了这些竹秆中多种气味韵调形成的物质基础,竹秆中较明显的青香、甜气和新鲜感是诱导圈养大熊猫选择这 6 种竹秆采食的主要气味韵调。

关键词:大熊猫;竹秆;气味机理;香气成分;嗅感品评;电子鼻;HS-SPME-GC-MS

中图分类号:S865.3;S795 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8141(2020)12-1395-09

Preliminary Study on Odor Mechanism in Captive Giant Pandas Selected 6 Species of Bamboo Culms for Ingesting

XIAN Yi-kun¹, WANG Hui², LI Song-bai³, LIN Jun-fan⁴, YANG Jin⁵, YANG Nan¹, FENG Zhi-xin⁵, BAO Qing-bin⁶

(1. Sichuan Academy of Natural Resource Sciences, Chengdu 610041, China; 2. College of Animal Science and Technology,

Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China; 3. Dadihank Biotech Corp., Chengdu 611130, China;

4. Chengdu Institute of Product Quality Inspection Co., Ltd, Chengdu 610100, China; 5. Agricultural and Rural Bureau of Qingshen County,

Meishan 620460, China; 6. School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In order to seek odor mechanism which captive giant pandas select bamboo culms to ingest, 6 species (*Bambusa ventricosa*, *Phyllostachys edulis*, *Bambusa prominens*, *Bambusa rigida*, *Dendrocalamus sapidus*, *Bambusa multiplex*) of fresh bamboo culms were fed to captive giant pandas for free selection and ingestion test. Ingestive behavior process was recorded. This paper analyzed samples using olfactory evaluation, electronic nose and HS-SPME-GC-MS. The results showed that these bamboo culms were ingested at different levels after smelled by captive giant pandas. The odors from the culms were composed of various notes, all had fresh, green, sweet and woody notes, but differences were intensity of sweet and woody notes or other faint notes such as herb note. The results by electronic nose supported odor differences among the culms. Formation materials of various notes from the culms were verified through HS-SPME-GC-MS. Obvious green, fresh and sweet notes from the culms were the main notes inducing captive giant pandas to selected the culms for ingesting.

Key words: giant panda; bamboo culm; odor mechanism; aroma component; olfactory evaluation; electronic nose; HS-SPME-GC-MS

大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)属植食性的食肉目动物,食性非常狭窄,在野生成兽的全部食物总量中 99% 是竹子的笋、秆、叶等^[1]。傅金和、刘颖颖、金学林等^[2]、刘颖颖^[3]、何东阳^[4]曾进行过多种竹子的投喂试验,结果表明圈养大熊猫不取食毛竹(四川等地俗称“楠竹”)等少数竹种的秆和叶,但均未研究竹子气味与大熊猫采食之间的关联性。仅有李涛、

李冲、司梦鑫等^[5]从药用保健角度和 Yuxiang Huang、Yamei Zhang、Yue Qi 等^[6]从家装板材角度用顶空(HS)—固相微萃取(SPME)—气相色谱(GC)—质谱(MS)法分析过毛竹秆的挥发性成分,但改换此法的关键技术节点如不同类型的 SPME 纤维头等会有不同的测定结果^[7]。大熊猫对竹秆的采食是否与竹秆的气味及呈香物质存在关联至今未见有研究报道。本文通过常喂竹种以外的 6 种新鲜竹秆饲喂大熊猫试验,记录大熊猫自由选择竹秆采食的行为过程,采集供试竹秆样品,再经专业人员嗅感品评、电子鼻测试和 HS-SPME-GC-MS 法分析挥发性有机物和香气成分,以揭示大熊猫采食竹秆的气味机理,为大熊猫可食竹资源开发利用与饲竹基地建设提供科学参考。

收稿日期:2020-07-02;修订日期:2020-09-10

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(编号:2019YFS0462);2017 年国家林业和草业局大熊猫国际合作资金项目。

第一作者及通讯作者简介:鲜义坤(1963-),男,四川省南部人,硕士,副研究员,主要从事珍稀濒危野生经济动物养殖研究。

通讯作者简介:包清彬(1962-),男,重庆市巴南人,教授,主要从事食品科学与工程研究。

1 材料与方法

1.1 试喂动物

供试大熊猫两只,健康状况良好,养于四川省青神县熊猫馆,日粮由苦竹、窝窝头、胡萝卜、苹果等组成,自由采食、饮水,圈内随意活动。试喂时段用供试竹种替代苦竹,此时段前后的饲喂和管理均与往常相同。两只大熊猫的基本信息如下:①苏星,雄性,生于2014年8月3日,谱系号为926。②华荣,雄性,生于2013年7月18日,谱系号为874。

1.2 供试竹种

供试竹种6个,具体名称详见表1,来源于青神县竹林湿地公园,在2012—2013年间人工栽种,竹龄至少3年。试喂之日上午砍回,剖开,采样后随机分成2份,分别喂给两只圈养大熊猫,上述工作尽快完成,以防竹子散失部分原始风味。

表1 供试竹种名称与采样试喂日期

序号	中文名称	拉丁名	采样日期	试喂日期
1	佛肚竹	<i>Bambusa ventricosa</i> McClure	2019-03-21	2020-06-10
2	毛竹	<i>Phyllostachys edulis</i> (Carrère) J. Houzeau	2019-04-10	2020-06-10
3	牛儿竹	<i>Bambusa prominens</i> H.L. Fung et C.Y. Sia	2019-04-10	2020-07-15
4	硬头黄竹	<i>Bambusa rigida</i> Keng et Keng f.	2019-04-16	2020-07-15
5	清甜竹	<i>Dendrocalamus sapidus</i> Q.H. Dai et D.Y. Huang	2019-04-16	2020-07-15
6	孝顺竹	<i>Bambusa multiplex</i> (Lour.) Raeuschel ex J.A. et J.H. Schult.	2019-04-16	2020-07-15

1.3 分析仪器

PEN 3型电子鼻由德国Airsense公司出品;Agilent 7890B-5977B型GC-MS联用仪、HP-INNOWax型石英毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)、20 mL顶空瓶及其相应的密封垫和铝盖均由美国Agilent公司出品;75 μm CAR/PDMS型SPME纤维头与手动进样手柄由美国Supelco公司出品;其他器材和用品为测试分析室常规配置。

1.4 样品采集、制备及自由选择采食试验

将砍回的竹子迅速进行多点随机采集样品,制备样品的具体方法参照相关文献^[8]。先将3—5种竹秆及其枝叶(其他竹秆和竹叶另文发表)放于外活动圈或/和内活动圈的食台上,分别做好标识,然后从隔离圈中放出大熊猫,通过监控设备或/和摄像机从多个角度记录大熊猫的自由选择采食情况。此法不仅可在监控室观察采食现场,使大熊猫自由选择采食时的人为干扰大幅降低,还便于此后仔细观看备份的录像,准确收集、整理、分析采食数据。另外,大熊猫可在多个竹种之间根据自己对食物风味的偏好,自由地选择采食先后和多寡。不同于日常饲喂

条件下供给的竹种相对单一,圈养大熊猫少有自由选择多种竹子采食的机会。

1.5 嗅感品评与仪器分析方法

嗅感品评和电子鼻测试除每种竹秆用样2.0g外其他具体方法分别参照相关文献^[7,8]。每种竹秆的HS-SPME用样约5.5g,在70℃下顶空萃取1h。其他HS-SPME-GC-MS联用的具体方法参照相关文献^[7-9]。

2 结果及分析

2.1 6种竹秆的大熊猫饲喂试验

根据饲喂试验现场观察和录像回放分析,圈养大熊猫采食竹秆的主要行为流程见图1。从图1可见,不管是先嗅闻后摄取,还是先摄取后嗅闻,圈养大熊猫采食竹秆时都要经过嗅闻竹秆气味韵调这一环节,这与文献^[2,3,10-12]记载相符,说明供试竹秆的气味韵调是关系到大熊猫是否继续进行下一步采食行为流程的决定性因素。

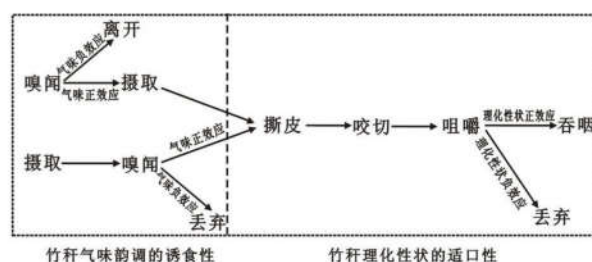


图1 圈养大熊猫采食竹秆的主要行为流程

本文重点关注大熊猫嗅闻供试竹秆后的继发行为是否采食,若嗅闻后采食,说明供试竹秆散发出的气味韵调具有诱食性,为大熊猫熟悉并认知安全,可以继续采食;若嗅闻后不采食,说明供试竹秆散发出的气味韵调不具诱食性,为大熊猫不熟知或可能存在不安全的隐患,故一闻便丢弃或选择离开而不食。推知嗅闻供试竹秆的气味韵调可能是大熊猫通过长期的自然选择与自身进化而形成的食物安全防线和养成的摄食行为习惯。至于采食供试竹秆数量的多少与供试竹秆理化性状的适口性好坏密切相关。6种供试竹秆的采食情况见表2。

根据表2中大熊猫嗅闻后的采食情况,将试喂期间所食的6种竹秆大致分为3类:①喜食类。大熊猫嗅闻后喜欢采食的竹秆,如佛肚竹秆、孝顺竹秆、硬头黄竹秆,说明这3种竹秆的气味韵调与味道质地等非营养性状对于作为大熊猫的食物而言均完全适合。②可食类。大熊猫嗅闻后可以采食的竹秆,如毛竹秆、牛儿竹秆,说明这2种竹秆的气味韵调能激发大熊猫的采食欲望,但味道和/或质地等化

学物理性状不太适合大熊猫的口感。③个体差异类。如清甜竹秆,2019年4月两只大熊猫嗅闻后均少量采食;而在2020年7月“华荣”嗅闻后不采食,“苏星”嗅闻后却喜欢采食,可能由于这两只大熊猫对清甜竹秆的嗅感满意度存在个体差异所致。这一现象笔者也曾于2015—2017年在峨眉山市仙芝竹尖生态园熊猫馆工作期间观察到过。陕西楼观台的大熊猫不取食毛竹秆^[2-4]可能由于个体差异或种间差异造成,也可能由于供试毛竹的气味韵调和大熊猫当时的饥饱程度等具体情况不同所致。

表2 6种供试竹秆的大熊猫采食情况

	华荣		苏星	
	2019年	2020年	2019年	2020年
佛肚竹秆	+++	+++	+++	+++
毛竹秆	+++	+	+++	+
牛儿竹秆	++	++	+	++
硬头黄竹秆	+++	++	+++	+++
清甜竹秆	+	×	+	+++
孝顺竹秆	+++	+++	+++	+++

注:“×”表示大熊猫嗅闻后没有采食;“+”表示大熊猫嗅闻后少量采食(约为投喂重量的5%以内);“++”表示大熊猫嗅闻后采食量约为投喂重量的5%—20%;“+++”表示大熊猫嗅闻后采食量约为投喂重量的20%以上。

由表2可知,6种供试竹秆散发出的气味韵调基本上能够激发大熊猫的采食欲望,引起不同数量的采食,其中佛肚竹秆、孝顺竹秆和硬头黄竹秆是大熊猫喜欢采食的竹秆。

2.2 6种竹秆的嗅感品评

通过专业人员对6种供试竹秆样品的嗅感盲评,这6种竹秆在同一重量下的气味强度不尽一致,有的竹秆气味偏浓(如牛儿竹秆),有的竹秆气味偏淡(如毛竹秆)。虽然细微的气味韵调各不相同,但是总体上清新、飘移、强度较高,扩散性和愉悦度均较好,可归属于竹秆类香气。6种供试竹秆的主要气味韵调详见表3。

表3 6种供试竹秆的主要气味韵调

	新鲜感	青香	甜气	木质气息	草香
佛肚竹秆	√	√	√	√	√
毛竹秆	√	√	√	√	√
牛儿竹秆	√	√	√	√	—
硬头黄竹秆	√	√	√	√	√
清甜竹秆	√	√	√	√	—
孝顺竹秆	√	√	√	√	√

注:汇总了2019年和2020年的品评结果。“√”表示嗅辨出的气味韵调;“—”表示未嗅辨出的气味韵调。

由表3可知,6种供试竹秆均有多种气味韵调,相同的是新鲜感、青香、甜气、木质气息,不同之处主要在于牛儿竹秆和清甜竹秆未品出草香。除表3所

示外,这6种竹秆的青香都较突出,但其他气味韵调的相对强度并非一致,如硬头黄竹秆和清甜竹秆的甜气较明显,清甜竹秆和牛儿竹秆相对其他竹秆而言木质气息要重点。有人从2019年的毛竹秆样品中嗅辨出淡淡的竹笋样韵调,有人在2019年和2020年分别从佛肚竹秆样品中嗅辨出微弱的竹笋样韵调和油脂气息,也有人在2020年从毛竹秆样品中嗅辨出微弱的酸气和油脂气息,还有人在2020年从硬头黄竹秆样品中嗅辨出微弱的脂肪酸气。似乎木质气息较高的竹秆如2019年的清甜竹秆大熊猫不食或少量采食,但含有竹笋样韵调的竹秆如佛肚竹秆大熊猫却喜欢采食,这些细微气味韵调与大熊猫采食与否的关联性有待进一步研究确定。

结合大熊猫对6种供试竹秆嗅闻后的采食行为表现可以得知,竹秆散发出的青香、甜气、新鲜感等主要香气韵调是大熊猫喜欢的食物香气韵调,能够诱导大熊猫采食。

2.3 6种竹秆的电子鼻测试

为了减少竹秆嗅感品评时的人为误差,本研究对6种供试竹秆样品进行了电子鼻测试,便于更客观地探索6种竹秆之间的整体气味信息异同。以测试稳定阶段的电子鼻响应值进行后续数据分析,6种竹秆的典型电子鼻响应值见图2。由图2可见,6种竹秆在R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₉、R₁₀7个传感器上的响应值差异均较小,但在R₆、R₇、R₈3个传感器上的响应值差异有所加大,尤其是在R₇传感器上的差异最大,其响应值大小依次为:毛竹秆>硬头黄竹秆>佛肚竹秆>牛儿竹秆>清甜竹秆>孝顺竹秆。

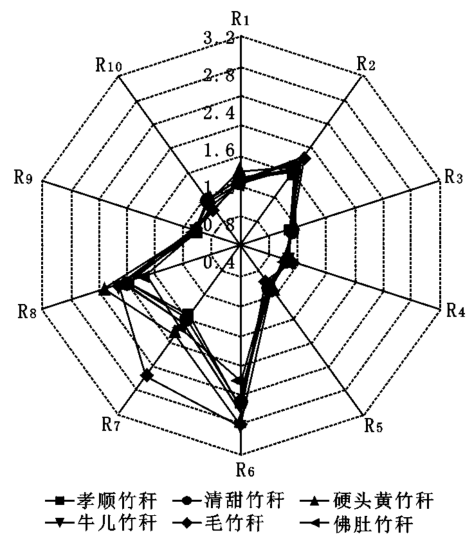


图2 电子鼻测试6种竹秆的响应值雷达图

主成分分析(PCA)^[7]结果见图3。从图3可见,第一主成分(PC₁)的贡献率为65.68%,第二主成分

(PC_2)贡献率为 30.89%, 累积贡献率为 96.57%, 高于 85%, 说明两个主成分所代表的信息能够完整反映竹秆的整体气味信息。孝顺竹秆、清甜竹秆和牛儿竹秆所在区域相互靠近, 仅在 PC_1 上有些许差异, 表明这 3 种竹秆的整体气味信息差别较小; 而佛肚竹秆、毛竹秆和硬头黄竹秆所在区域相互均有一定距离, 表明这 3 种竹秆的整体气味信息差别较大, PCA 分析能将其准确区分。

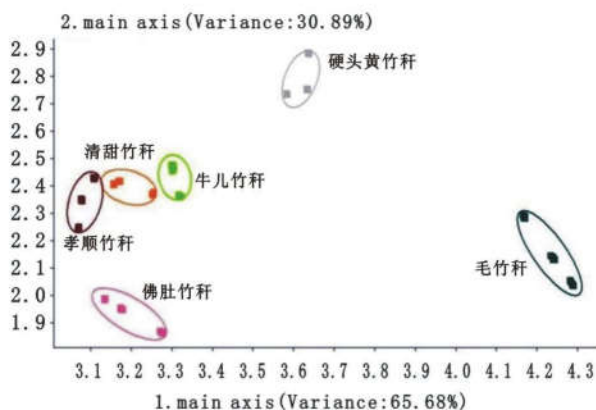


图 3 6 种竹秆的电子鼻 PCA 分析

线性判别分析(LDA)^[7]结果见图 4。从图 4 可见, LD_1 和 LD_2 的贡献率分别为 68.50% 和 21.11%, 累积贡献率达 89.61%。仅有佛肚竹秆和孝顺竹秆的所在区域存在相互重叠, 其他竹秆彼此独立, 表明电子鼻 LDA 分析能有效区分毛竹秆、牛儿竹秆、清甜竹秆、硬头黄竹秆这 4 种竹秆的整体气味信息, 但难以区分佛肚竹秆和孝顺竹秆, 而在 PCA 分析中相近的清甜竹秆和牛儿竹秆却在 LDA 分析中得以较好的区分。

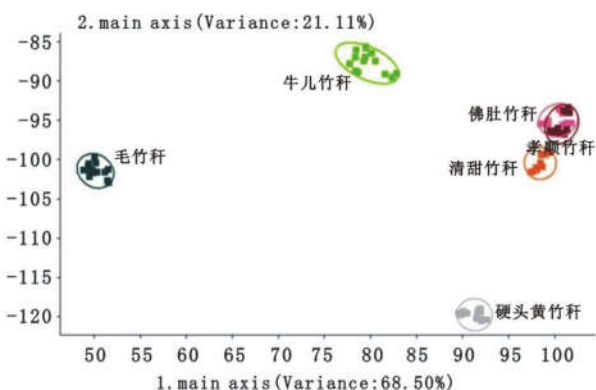


图 4 6 种竹秆的电子鼻 LDA 分析

载荷分析(LA)^[7]结果见图 5。从图 5 可见, 对第一主成分(PC_1)影响最大的传感器为 R_7 , 其他依次为 R_6 、 R_8 、 R_2 ; 对第二主成分(PC_2)影响最大的传感器为 R_8 , 其他依次为 R_6 、 R_1 。另外 5 个传感器 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_9 、 R_{10} 均在坐标原点附近, 说明这 5 个传感

器所对应的挥发性物质类别在 6 种供试竹秆之间差异均较小。根据电子鼻不同的传感器对不同类别的挥发性物质的特殊灵敏性^[7]可知: 6 种供试竹秆之间的气味差异可能主要与萜烯类、醇类、醛类、酮类、甲基类、氮氧化物和芳香类等挥发性物质有关。

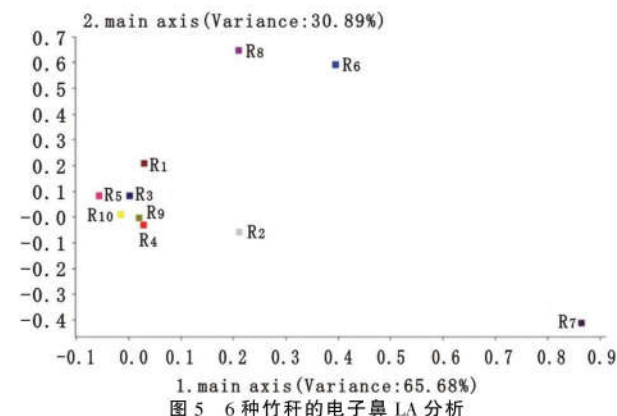


图 5 6 种竹秆的电子鼻 LA 分析

经电子鼻测试, 6 种供试竹秆的整体气味信息各不相同, 可通过 PCA 分析结合 LDA 分析予以较好的区分, 预示这 6 种竹秆的气味可能存在一定差异, 与上述专业人员的嗅感品评结果大体相符, 同时也表明气味的差异可能由于萜烯类、醇类、醛类、酮类、甲基类、氮氧化物和芳香类等挥发性物质的不同而引起。因此, 有必要用 HS-SPME-GC-MS 法进一步测定这 6 种竹秆中的挥发性成分特别是典型的呈香成分, 以便深入剖析这 6 种竹秆之间气味韵调异同的物质原由。

2.4 6 种竹秆中的挥发性有机物和香气成分

经 HS-SPME-GC-MS 联用法分析, 6 种供试竹秆中的挥发性有机物类别及其成分种数和相对含量统计结果详见表 4。由表 4 可知, 6 种供试竹秆在挥发性有机物类别的成分种数和相对含量方面互不相同, 存在大小不一的差异, 烯炔类、醇类、醛类、酮类等尤为如此, 这与电子鼻测试结果(本文将萜烯类归于烯炔类)基本相符, 进一步说明这 6 种竹秆的气味韵调及其强度有可能存在一定程度的异同。

竹秆的气味虽与挥发性有机物有关, 但起主要作用的成分是被国内外公认的呈香物质。竹秆中的典型香气成分按照文献^[13]的判定标准, 从测出的挥发性有机物中筛选出的食品级单体呈香物质。6 种供试竹秆中的香气成分详见表 5。

由表 5 可知, 从 6 种供试竹秆中分别测出了 46—67 种数量不等的香气成分, 总共测出了 118 种香气成分。其中, 具有青香韵调香气成分有 45 种, 具有甜气韵调的香气成分有 33 种, 具有木质气味的香气成分有 17 种, 具有草香韵调的香气成分有 11

种,具有新鲜韵调的香气成分有 4 种,说明专业人员对 6 种供试竹秆品评出的主要气味韵调是有物质基础支撑的。从 6 种竹秆中均测出的香气成分有 24 种,分别是:3-甲基丁醛、己醛、庚醛、反式-2-己烯醛、2-戊基呋喃、1-戊醇、苯乙烯、辛醛、反式-2-庚烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-己烯-1-醇、壬醛、反式-2-辛烯醛、2-乙基-1-己醇、癸醛、苯甲醛、1-辛醇、苯乙醛、1-壬醇、水杨酸甲酯、己酸、香叶基丙酮、苯甲醇、吡嗪。在这 24 种共同的香气成分中赋予竹秆青香气味的有 3-甲基丁

醛、己醛、反式-2-己烯醛、2-戊基呋喃、反式-2-庚烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-己烯-1-醇、反式-2-辛烯醛、1-辛醇、苯乙醛、香叶基丙酮等 11 种,赋予竹秆甜气的有辛醛、癸醛、1-辛醇、苯乙醛、水杨酸甲酯、苯甲醇等 6 种,赋予竹秆木质气息的有己醛、香叶基丙酮等 2 种,赋予竹秆草香气味的有己醛、反式-2-己烯醛、3-己烯-1-醇等 3 种,赋予竹秆新鲜感的有 1-辛醇和香叶基丙酮等 2 种。这有力支持了表 3 中 6 种竹秆的主要气味韵调。

表 4 6 种竹秆中的挥发性有机物类别及其成分种数和相对含量统计

项目	烷烃类	烯烃类	芳烃类	醇类	酚类	醚类	醛类	酮类	羧酸类	酯类	杂环类	其他类	合计	
佛肚竹秆	成分数量(种)	1	8	4	12	5	2	23	4	2	5	6	4	76
	相对含量(%)	—	2.01	0.40	8.33	0.67	0.21	67.38	2.76	0.23	4.19	8.90	1.05	96.13
毛竹秆	成分数量(种)	15	39	1	11	5	2	13	17	3	4	3	4	117
	相对含量(%)	19.73	44.64	0.00	4.82	2.02	0.41	8.73	11.34	0.24	1.07	2.90	0.84	96.74
牛儿竹秆	成分数量(种)	5	19	5	19	6	1	19	8	7	6	5	3	104
	相对含量(%)	1.06	11.19	1.72	34.30	0.78	0.30	28.55	1.78	1.34	8.05	4.47	1.01	94.55
硬头黄竹秆	成分数量(种)	3	11	5	14	7	—	19	7	6	3	3	3	81
	相对含量(%)	0.21	14.53	4.85	9.69	1.70	—	39.97	2.37	1.10	13.12	0.68	1.10	89.32
清甜竹秆	成分数量(种)	10	11	5	16	2	1	23	10	10	3	4	4	99
	相对含量(%)	7.27	12.41	2.04	9.44	0.51	—	48.95	2.63	4.90	2.92	2.42	0.93	94.42
孝顺竹秆	成分数量(种)	4	10	1	13	2	—	24	10	7	9	7	3	90
	相对含量(%)	0.95	4.82	0.17	7.16	0.26	—	56.87	1.95	1.59	10.49	8.28	0.31	92.85

注:成分种数汇总了 2019 年和 2020 年的测定结果,相对含量为两年的算术平均值,因匹配度 < 80% 而不能推定的成分及其相对含量均未纳入统计分析,但所有色谱峰的相对含量总和为 100%。“—”表示仪器未自动算出或未检出;“其他类”包括酰胺类、含氮化合物和脂类。

表 5 6 种竹秆中的香气成分及其主要相关气味韵调

香气成分名称	佛肚竹秆	毛竹秆	牛儿竹秆	硬头黄竹秆	清甜竹秆	孝顺竹秆	主要相关的气味韵调 ^[14-21]
1 乙醇	—	— ^[5,6]	√	—	—	—	
2 3-甲基丁醛	√	√ ^[5]	√	√	√	√	青香等香气
3 2-乙基呋喃	√	—	√	√	√	√	
4 戊醛	√	— ^[5]	√	—	√	√	
5 2-甲基丁酸甲酯	—	—	—	—	—	√	甜的、果香、青香等香气
6 1-戊烯-3-酮	√	√	√	—	√	√	
7 己醛	√	√ ^[5,6]	√	√	√	√	强烈的、青香、木香、草香、蔬菜香、水果香等香气
8 3-戊醇※	—	—	—	√	—	—	
9 β-蒎烯	—	—	√	—	—	—	松木、松节油样香气
10 3-己烯醛	√	—	—	—	—	√	草香、青香、绿叶香
11 1-丁醇	—	—	√	—	√	—	杂醇油气息
12 1-戊烯-3-醇	√	—	√	—	√	√	果香、蔬菜香等气味
13 月桂烯	—	—	√	—	—	—	蜡香、青香、果香、木香等香气
14 2-庚酮	—	√ ^[6]	—	—	—	√	水果、青香等香气
15 庚醛	√	√ ^[6]	√	√	√	√	浓郁的果实香、脂肪等香气
16 d-柠檬烯	—	√	√	—	—	—	甜的、柠檬、柑橘香气
17 反式-2-己烯醛	√	√	√	√	√	√	青香、果香、脂肪、青草等香气
18 2-己烯醛	√	—	√	—	√	√	青香、果香、脂肪、青草等香气
19 2-戊基呋喃	√	√ ^[5]	√	√	√	√	果香、壤香、青香、类似蔬菜等香韵
20 6-甲基-2-庚酮※	—	√	—	—	—	—	
21 1-戊醇	√	√	√	√	√	√	果香等香气
22 β-罗勒烯	—	√	√	√	√	√	甜的、青香、果香、木香、蔬菜等香气
23 顺式-4-庚烯醛	—	—	—	—	—	√	青香、脂肪香气
24 3-辛酮	—	√	—	—	—	—	甜的、水果、青香、壤香等香气

(续表 5)

香气成分名称	佛肚竹秆	毛竹秆	牛儿竹秆	硬头黄竹秆	清甜竹秆	孝顺竹秆	主要相关的气味韵调 ^[14-21]
25 苯乙烯	√	√	√	√	√	√	树脂、花香香气
26 4-异丙基甲苯	—	—	√	—	—	—	特征的胡萝卜等香气
27 顺式-3-己烯酸甲酯※	—	—	—	—	—	√	水果的青香和甜香
28 2-辛酮	—	√	—	—	√	√	脂肪、青香等香气
29 3-羟基-2-丁酮	—	— ^[5]	√	—	—	—	温和的、木香等香气
30 辛醛	√	√ ^[6]	√	√	√	√	似甜橙、轻微油脂、蜂蜜样香气
31 顺式-2-戊烯-1-醇※	√	—	√	√	√	√	青香等香气
32 反式-2-庚烯醛	√	√	√	√	√	√	青香、果香、脂肪等香气
33 2,3-辛二酮	—	—	√	√	—	—	甜的奶油香
34 6-甲基-5-庚烯-2-酮	√	√	√	√	√	√	水果、脂肪、青香等香气
35 1-己醇	√	—	√	—	√	—	青香、果香、甜香等香气
36 顺式-3-己烯-1-醇	—	—	√	√	√	√	青香、药草香和绿叶香
37 3-己烯-1-醇※	√	√	√	√	√	√	青香、草香等香气
38 2-壬酮	—	√	—	—	√	—	果香、甜香、青香等气味
39 壬醛	√	√ ^[5,6]	√	√	√	√	脂肪、柑橘等香气
40 反式,反式-2,4-己二烯醛	√	—	√	—	√	√	甜的、青香、果香等香气
41 反式-2-十二烯醛	—	—	—	—	—	√	脂肪、青香等香气
42 反式-2-辛烯醛	√	√	√	√	√	√	尖刺的脂肪、青香等香气
43 1-辛烯-3-醇	√	√	√	√	—	√	壤香、青香、蔬菜香和油腻的气息
44 1-庚醇	—	√	√	—	√	—	青香、脂肪香气
45 反式,反式-2,4-庚二烯醛	√	—	√	√	√	√	青香、脂肪、水果等香气
46 乙酸	—	— ^[5,6]	√	√	—	—	尖刺的醋香气
47 2-乙基-1-己醇	√	√ ^[5,6]	√	√	√	√	蘑菇香气
48 1-十六醇	—	—	—	—	√	—	微弱甜香气
49 2-癸酮	—	√	—	—	√	—	脂肪、水果香气
50 茶螺烷	—	—	—	—	—	√	木香、药草香等气味
51 癸醛	√	√ ^[6]	√	√	√	√	甜的、脂肪等香气
52 2-萘酮	—	—	—	√	—	—	类似薄荷的清凉气息
53 苯甲醛	√	√ ^[5]	√	√	√	√	果香等香气
54 反式-2-壬烯醛	√	—	√	√	√	—	脂肪、青香、蔬菜等香气
55 亚苄基二甲基醚※	√	√	√	—	√	—	甜的、青香、水果等香气
56 芳樟醇	√	—	√	√	√	√	新鲜、甜的、青香、木香等香气
57 1-辛醇	√	√ ^[5]	√	√	√	√	新鲜、青香、甜橙、甜花香等香气
58 甲酸辛酯※	—	—	√	—	—	—	新鲜的果香、青香香气
59 β-石竹烯	—	√	√	—	—	—	木香等香气
60 5-乙基-2(5H)-呋喃酮※	—	—	—	—	—	√	
61 2-十一酮	—	√ ^[6]	—	—	—	√	脂肪、水果等香气
62 十一醛	—	√	—	—	√	—	脂肪等香气
63 反式-2-辛烯-1-醇	—	√	—	—	—	—	青香、蔬菜样香气
64 苯甲酸甲酯	—	—	√	—	—	√	果香等香气
65 反式-2-癸烯醛	—	—	—	√	—	—	脂肪等气味
66 β-环柠檬醛	—	—	—	√	—	—	凉香、果香和清香
67 苯乙醛	√	√	√	√	√	√	甜的、青香、壤香等香气
68 1-壬醇	√	√	√	√	√	√	脂肪(油脂)等气息
69 反式-β-金合欢烯	—	√	—	—	—	—	木香、青蔬菜、药草等香气
70 戊酸	—	—	—	√	√	—	尖刺的酸气,果香等香气
71 3-甲基丁酸	—	— ^[5]	—	—	√	√	水果等香气
72 六氢假性紫罗兰酮※	—	√ ^[6]	√	√	√	—	
73 2-十二酮※	—	√	—	—	√	—	
74 十二醛	—	√	—	—	—	—	甜的、柑橘等香气
75 β-红没药烯	—	√	—	—	—	—	木香、水果、青香等香气
76 α-金合欢烯	—	—	√	—	—	√	木香、青香、草香等香气
77 水杨酸甲酯	√	√	√	√	√	√	甜的、冬青特征等香气
78 2-十三酮	—	√	—	—	√	√	果香、甜香、青香等香气
79 α-甲基苯甲醇	—	—	—	√	—	—	甜的、壤香、青香等香气

(续表 5)

	香气成分名称	佛肚竹秆	毛竹秆	牛儿竹秆	硬头黄竹秆	清甜竹秆	孝顺竹秆	主要相关的气味韵调 ^[14-21]
80	己酸	√	√ ^[6]	√	√	√	√	
81	香叶基丙酮	√	√ ^[6]	√	√	√	√	新鲜、青香、果香、木香等香气
82	丁酸苯甲酯	—	—	—	—	—	√	甜的、水果等香气
83	十三醛※	—	√	—	—	—	—	清香气味
84	愈创木酚	—	— ^[6]	√	—	—	—	木香等香气
85	苯甲醇	√	√	√	√	√	√	甜的、果香等香气
86	3-甲基丁酸苯甲酯	—	—	—	—	—	√	甜的、水果等香气
87	苯乙醇	—	—	√	—	—	√	甜的、壤香、青香、木香等香气
88	庚酸	—	√ ^[6]	√	—	—	—	甜的、水果等香气
89	2-十四酮※	—	√	—	—	—	—	
90	十四醛	—	—	—	—	√	—	脂肪、水果等香气
91	β-紫罗兰酮	—	—	—	√	—	√	甜的、木香、果香、青香等香气
92	苯并噻唑	—	—	—	—	√	—	蔬菜等香气
93	4-甲基愈创木酚	—	—	—	√	—	—	甜的、药草等香气
94	1-十二醇	√	√	√	—	√	—	油、蜡香气
95	3-己烯酸	—	—	—	—	√	√	青香等香气
96	反式-2-己烯酸	√	—	—	—	—	—	果香、药草等香气
97	苯酚	√	√ ^[6]	—	—	—	—	酚样、药香气
98	2-十五酮	—	√	—	—	—	—	脂肪香等香气
99	辛酸	—	√ ^[6]	√	√	√	√	甜香等香气
100	4-甲基苯酚	√	—	—	√	—	—	
101	3-甲基苯酚	—	—	√	—	—	—	芳香气味
102	雪松醇※	—	— ^[6]	√	√	√	√	木香等香气
103	1-十四醇※	—	—	√	—	—	—	脂肪等香气
104	丁香酚	—	√	—	√	—	—	
105	α-红没药醇※	—	√	—	—	—	—	柠檬、柑橘、花香
106	4-乙基苯酚	—	—	—	√	—	—	木香、甜香等香气
107	壬酸	—	— ^[6]	√	—	√	√	脂肪等香气
108	癸酸	—	—	√	√	√	√	脂肪等香气
109	4-乙烯基愈创木酚	—	—	√	—	—	—	
110	4-烯丙基苯酚※	—	√	—	—	—	—	
111	4-乙烯基苯酚	√	√	—	√	—	—	甜香等香气
112	吡嗪	√	√	√	√	√	√	
113	十二酸	—	—	√	√	√	√	
114	苯甲酸苯酯	√	—	—	—	—	—	甜的、果香等香气
115	香兰素	√	—	—	—	—	—	甜的、特征的香荚兰香等香气
116	水杨酸苯酯	—	√	—	—	—	—	甜的、果香等香气
117	十六酸	—	—	—	—	√	—	
118	1,4-苯二酚※	√	—	√	√	√	√	
	成分种数合计	46	58	67	52	61	61	

注:汇总了 2019 年和 2020 年的测定结果,“√”表示样品中检出且匹配度≥80%的香气成分,“—”表示样品中未检出或虽检出但匹配度<80%的香气成分,上标表示已有文献报道或记载,“※”表示我国食品安全国家标准——《食品添加剂使用标准》(GB 2760—2014)和《食品用香料通则》(GB 29938—2013)中规定不允许在各类食品加工过程中使用的单体呈香物质。

竹秆的某种气味韵调是由多种香气成分相互作用(或协同增效或抵消减弱)后最终呈现出的某种嗅觉感受。共同的香气成分是 6 种竹秆具有相同气味韵调的物质基础;互不相同的香气成分(详见表 5)或呈现在某种共同气味韵调的强度上,或抵消减弱某种气味韵调,或呈现在某种竹秆的特殊气味韵调上。6 种供试竹秆中香气成分的分类及其成分种数和相对含量统计结果详见表 6。

由表 6 可知,从 6 种供试竹秆中检出的香气成分类别数有 8—10 个不等,其中硬头黄竹秆和孝顺竹秆有 8 个类别,佛肚竹秆、毛竹秆和清甜竹秆有 9 个类别,牛儿竹秆有 10 个类别。香气成分种数最多

和相对含量最高的类别在佛肚竹秆、硬头黄竹秆、清甜竹秆和孝顺竹秆中均为醛类,醛类香气成分种数在总数中的占比分别为 39.13%、28.85%、29.51%及 29.51%;在毛竹秆中则为酮类,占比为 29.31%;在牛儿竹秆中则为醇类,占比为 28.36%。说明不同竹种的最主要香气成分类别有的相同,有的不同。醛类香气成分是佛肚竹秆、硬头黄竹秆、清甜竹秆和孝顺竹秆中香气韵调及其强度的主要贡献者,酮类香气成分是毛竹秆中香气韵调及其强度的主要贡献者,醇类香气成分则是牛儿竹秆中香气韵调及其强度的主要贡献者。从表 5 中单一香气成分的主要相关气味韵调^[14-21]可知,竹秆某种气味韵调的主要

相关成分有多个类别,如:具有青香韵调的香气成分类别有烯烴类、醇类、醚类、醛类、酮类、羧酸类、酯类和杂环类 8 类,具有甜气韵调的香气成分类别有烯烴类、醇类、酚类、醚类、醛类、酮类、羧酸类和酯类 8 类,具有木香气息的香气成分类别有烯烴类、醇类、酚类、醛类、酮类和杂环类 6 类,具有草香韵调的香气成分类别有烯烴类、醇类、酚类、醚类、醛类、酮类和杂环类 6 类,具有新鲜韵调的香气成分类别有醇类、酮类和酯类 3 类。在所有香气成分的相对含量合计方面,毛竹秆最低,仅为 33.06%,气味强度应最低,这与专业人员的品评结果一致。

表 6 6 种竹秆中香气成分的种类及其成分种数和相对含量

项目	烯烴类	芳烴类	醇类	酚类	醚类	醛类	酮类	羧酸类	酯类	杂环类	合计	
佛肚竹秆	成分数量(种)	1	—	12	4	1	18	3	2	2	3	46
	相对含量(%)	1.04	—	8.33	—	—	63.81	2.62	0.23	4.04	8.57	88.64
毛竹秆	成分数量(种)	6	—	11	4	1	12	17	3	2	2	58
	相对含量(%)	3.22	—	4.82	1.48	0.41	8.53	11.34	0.24	1.07	1.95	33.06
牛儿竹秆	成分数量(种)	7	1	19	4	1	16	6	7	3	3	67
	相对含量(%)	8.86	—	34.30	0.47	0.30	28.10	1.44	1.34	7.33	4.26	86.40
硬头黄竹秆	成分数量(种)	2	—	13	6	—	15	6	6	1	3	52
	相对含量(%)	11.12	—	9.69	1.55	—	38.96	2.37	1.10	12.72	0.68	78.19
清甜竹秆	成分数量(种)	2	—	16	1	1	18	9	9	1	4	61
	相对含量(%)	5.92	—	9.44	0.28	—	47.44	2.35	4.15	2.72	2.42	74.72
孝顺竹秆	成分数量(种)	3	—	13	1	—	18	8	7	6	5	61
	相对含量(%)	3.48	—	7.16	0.14	—	54.64	1.95	1.59	9.86	8.11	86.93

注:成分种数汇总了 2019 年和 2020 年用 HS—SPME—GC—MS 联用法测定的结果,相对含量为两年的算术平均值,因匹配度 < 80% 而不能推定的成分及其相对含量均未纳入统计分析。“—”表示未检出或仪器未自动算出。

表 7 6 种竹秆中相对含量前五位的香气成分

项目	第一位	第二位	第三位	第四位	第五位	合计	
佛肚竹秆	香气成分名称	2-己烯醛	己醛	2-乙基呋喃	壬醛	水杨酸甲酯	
	相对含量(%)	43.68	6.19	4.82	4.13	3.98	62.80
毛竹秆	香气成分名称	壬醛	苯甲醛	己醛	吡啶	癸醛	
	相对含量(%)	7.80	3.01	1.76	1.70	1.18	15.45
牛儿竹秆	香气成分名称	芳樟醇	反式-2-己烯醛	水杨酸甲酯	壬醛	苯乙烯	
	相对含量(%)	24.56	11.49	6.95	5.26	4.69	52.95
硬头黄竹秆	香气成分名称	水杨酸甲酯	壬醛	苯乙烯	反式-2-己烯醛	己醛	
	相对含量(%)	12.72	10.86	8.57	5.53	5.24	42.92
清甜竹秆	香气成分名称	反式-2-己烯醛	壬醛	己醛	苯乙醛	3-甲基丁醛	
	相对含量(%)	12.83	9.15	6.22	3.79	3.44	35.43
孝顺竹秆	香气成分名称	反式-2-己烯醛	壬醛	吡啶	3-甲基丁醛	水杨酸甲酯	
	相对含量(%)	25.38	6.07	5.34	4.95	4.89	46.63

注:相对含量为 2019 年和 2020 年两年的算术平均值。

3 结论、讨论与建议

3.1 结论与讨论

大熊猫喜欢竹秆的香气韵调:据此前的观察,喂给大熊猫的竹秆如果在食台上放置时间较长,特别是在气温较高的天气里,容易失水变干,新鲜感降低,部分青香散失,大熊猫不再采食;通过对放置较久的竹秆样品的嗅感品评发现,木质气息还加重一

些,因此在竹秆的复合型气味中过重的木质气息不为大熊猫所喜欢。大熊猫乳汁中也具有青香和甜气^[22],说明大熊猫从出生后吸食母乳就开始接触和感受青香和甜气这两种香气韵调,即青香和甜气是大熊猫从小就熟悉并认知安全的气味韵调。圈养大熊猫喜食的苹果、胡萝卜和玉米秸秆都有明显的甜气和青香^[8,13]。综上所述,竹秆的青香、甜气、新鲜感是大熊猫喜欢的香气韵调。

大熊猫对竹秆选择性采食的气味机理:动物嗅觉的生理功能是感知环境空气中或附近物体发出的气味,不同物种的嗅觉灵敏度各不相同。大熊猫的视觉较差,主要依靠发达的嗅觉来寻觅食物^[11]。无论是白天还是黑夜,大熊猫在觅食竹子时都要用鼻子嗅闻拟食竹子的气味韵调,即大熊猫在采食竹子之前有着显而易见的嗅闻识别过程。大熊猫通过鼻子的灵敏嗅觉在感受并分辨竹子散发出的气味韵调后,大脑综合判断这些气味韵调是否熟知和安全而且有无采食兴趣,这可能是大熊猫自冰川时代以来在不断适应自然环境变化过程中长期积累并代代相传的生存智慧之一。上述研究表明,6种供试竹秆的气味韵调类型和强度虽然不尽相同,但是均有较明显的青香、甜气、新鲜感等气味韵调,加之圈养大熊猫对这6种竹秆均有不同程度的采食,因此这6种竹秆散发出的较明显的青香、甜气、新鲜感等气味韵调是诱导圈养大熊猫采食的主要气味理由。笔者还认为,在食物供给相对充足的圈养条件下竹秆的气味韵调为大熊猫是否选择采食的首要食物因素,也是评价饲喂给圈养大熊猫竹秆品质的一个重要的非营养性指标。

3.2 建议

基于上述研究,根据圈养大熊猫选择竹秆采食的气味机理,提出生产实际应用中的建议:①饲喂大熊猫的竹秆最好现砍现喂,若不能现砍现喂,大熊猫饲养单位要有竹秆的低温保鲜设备设施,因为竹秆一旦散失新鲜感、青香等气味韵调,对大熊猫来说就缺乏诱食作用。②在给圈养大熊猫投喂竹秆前先将竹秆破开(尤其是粗大的竹秆更应如此),以便于竹秆里面的气味散发出来,增强竹秆气味韵调的诱食性,提高竹秆的大熊猫食用率,降低大熊猫的饲料成本。③在研制亚成体和成体大熊猫诱食剂时,表5中除带※号者在我国不能添加外,其他香气成分物质均可酌情酌量考虑使用。④野生大熊猫采食的竹种生长在高山和亚高山地带,但圈养大熊猫却以低山平坝地区的竹子为主,本文所用的6个供试竹种均是在低山平坝地区人工栽种。我国的大熊猫主食竹共有13属78种1变种7栽培品种,其中包括孝顺竹和硬头黄竹^[23],因此可在大熊猫饲养单位附近区域人工栽种这两个竹种,既可作为观赏用竹和美化环境,又可作为大熊猫的应急食物来源,也可作为大熊猫饲竹大型基地建设的备选竹种。

(致谢:李策宏、陈绪玲、杨平、孔凌、黄明亚、刘张育、邓虹、赵仁仟、喻麟、李小兵、向琴、胡静为本项目研究提供了大

力支持与帮助,在此一并表示感谢!)

参考文献:

- [1]胡锦矗.大熊猫的摄食行为[J].生物学通报,1995,(9):14-18.
- [2]傅金和,刘颖颖,金学林,等.秦岭地区圈养大熊猫对投食竹种的选择研究[J].林业科学研究,2008,21(6):813-817.
- [3]刘颖颖.秦岭圈养大熊猫对投食竹种的选择研究[D].北京:中国林业科学研究院硕士学位论文,2009.
- [4]何东阳.大熊猫取食竹选择、消化率及营养和能量对策的研究[D].北京:北京林业大学博士学位论文,2010.
- [5]李涛,李冲,司梦鑫,等.HS-SPME-GC-MS法分析楠竹中的挥发性成分[J].华西药学杂志,2020,35(1):74-77.
- [6]Yuxiang Huang, Yamei Zhang, Yue Qi. *et al.* Identification of Odorous Constituents of Bamboo during Thermal Treatment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203(1): 104-110.
- [7]鲜义坤,王承东,林俊帆,等.补饲大熊猫幼仔奶粉的气味特点与香气成分研究[J].资源开发与市场,2020,36(2):164-173,217.
- [8]鲜义坤,杨楠,邓虹,等.大熊猫选择新鲜玉米秸秆采食的气味机理探究[J].黑龙江畜牧兽医,2020,(14):133-137.
- [9]鲜义坤,李果,李裕冬,等.圈养大熊猫乳汁香气成分探究[J].资源开发与市场,2019,35(12):1513-1524.
- [10]胡锦矗,夏勒,潘文石,等.卧龙的大熊猫[M].成都:四川科学技术出版社,1985.
- [11]汤纯香.大熊猫采食行为的研究[J].动物学杂志,1992,21(4):46-49.
- [12]阮世炬,雍严格.大熊猫野外喂食和觅食的观察[J].野生动物,1983,(1):5-8.
- [13]鲜义坤,杨楠,孔凌,等.圈养大熊猫所食苹果和胡萝卜的气味特点与香气成分研究[J].饲料博览,2020,(6):1-9,19.
- [14]孙宝国,刘玉平.食用香料手册[M].北京:中国石化出版社,2004.
- [15]孙宝国,何坚.香料概论(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [16]安会敏,欧行畅,熊一帆,等.茉莉花茶特征香气成分研究[J].茶叶科学,2020,40(2):225-237.
- [17]钱建瑛,高原,陆震鸣,等.文蛤酶热处理后呈味物质分析及感官评价[J].食品科技,2016,41(10):106-112.
- [18]仲梦涵,陆晨浩,王曦如,等.烘烤和发芽对大麦挥发性风味影响的分析研究[J].食品工业科技,2020,41(7):220-225,232.
- [19]George A. Burdock. Fenaroli's Handbook of Flavor Ingredients[M]. Florida: CRC Press, 2010.
- [20]蒋鹏飞,王赵改,史冠莹,等.不同干燥方式的苦瓜粉品质特性及香气成分比较[J].现代食品科技,2020,36(3):234-244.
- [21]于倩,蒋玉梅,李霁昕,等.霞多丽葡萄、苦水玫瑰及其混合发酵酒的香气比较分析[J].食品工业科技,2012,33(22):172-177.
- [22]鲜义坤,王承东,李松柏,等.圈养大熊猫乳汁风味特征初探[J].经济动物学报,2019,23(4):201-206.
- [23]史军义,周德群,陈其兵,等.大熊猫主食竹增补竹种整理[J].世界竹藤通讯,2018,16(2):53-62.