

doi:10.3969/j.issn.1005-8141.2021.07.013

圈养大熊猫所食 2 种竹笋的气味特点和香气成分研究

杨楠¹, 林俊帆², 邓虹³, 杨进⁴, 王慧⁵, 赵仁仟³, 冯志新⁴, 鲜义坤¹

(1. 四川省自然资源科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 成都产品质量检验研究院有限责任公司, 四川 成都 610100;

3. 成都大帝汉克生物科技有限公司, 四川 成都 611130; 4. 青神县农业农村局, 四川 眉山 620460;

5. 西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探索大熊猫选择竹类食物采食的气味机理, 选用新鲜的 3 种可食竹秆、2—3 种可食竹叶、1 种供试竹笋饲喂大熊猫, 观察记录大熊猫在同时提供多种竹类食物的条件下自由选择采食行为过程, 随机采集的竹笋样品通过嗅感品评、电子鼻测试、HS-SPME-GC-MS 联用法测定, 以研究竹笋的气味特点和香气成分。结果表明: 受试大熊猫在嗅闻雷竹笋或斑竹笋之后均优先于其他竹类食物选择竹笋采食, 这 2 种供试竹笋的气味均有多种韵调, 相同之处在于青香、新鲜感、嫩感、水润多汁感、甜气、果香、木质气息、草叶香和壤香, 不同之处在于这些气味韵调的相对强度大小或有花香气息、油脂气息、药味等其他细微的韵调; 电子鼻测试结果证明了这 2 种竹笋间气味韵调的差异性; 香气成分分析结果证实了这 2 种竹笋中多种气味形成的物质基础, 醛类和醇类香气成分在这 2 种竹笋中香气韵调及其强度的主要贡献物质类别。竹笋中明显的青香、新鲜感、嫩感、水润多汁感、轻微的甜气和果香等可能是诱导圈养大熊猫优先选择雷竹笋或斑竹笋采食的主要气味韵调。

关键词:大熊猫; 竹笋; 气味; VOCs; 香气成分; 电子鼻; HS-SPME-GC-MS

中图分类号:S816.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8141(2021)07-0850-08

Research on Odor Characteristics and Aroma Components from 2 Species of Bamboo Shoots Ingested by Captive Giant Pandas

YANG Nan¹, LIN Jun-fan², DENG Hong³, YANG Jin⁴, WANG Hui⁵, ZHAO Run-qian³, FENG Zhi-xin⁴, XIAN Yi-kun¹

(1. Sichuan Provincial Academy of Natural Resource Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Institute of Product Quality Inspection Co., Ltd, Chengdu 610100, China;

3. Dadihank Biotech Corp., Chengdu 611130, China; 4. Agricultural and Rural Bureau of Qingshen County, Meishan 620460, China;

5. College of Animal Science and Technology, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to seek odor mechanism which captive giant pandas select bamboo foods to ingest, 3 species of fresh edible bamboo culms, 2 or 3 species of fresh edible bamboo leaves, 1 of 2 tested species (*Phyllostachys violascens* 'Prevernalis', *Phyllostachys bambusoides f. lacrima-deae*) of fresh bamboo shoots were fed to captive giant pandas for free selection and ingestion test. The ingesting behavior processes the giant pandas freely selected bamboo foods were observed and recorded under the conditions of simultaneous providing multiple bamboo foods. The bamboo shoot samples collected randomly were analysed using olfactory evaluation, electronic nose and HS-SPME-GC-MS for odor characteristics and aroma components. The results showed that these 2 species of bamboo shoots were ingested in preference to other bamboo foods after *Phyllostachys violascens* 'Prevernalis' shoot or *Phyllostachys bambusoides f. lacrima-deae* shoot smelled by tested giant pandas. The odors from the shoots were composed of various notes, all had fresh, tender, juicy, green, sweet, fruity, woody, grassy, leafy and earthy notes, but differences were relative intensity of these notes or other faint notes such as floral, fat, oil, herb notes. The results by electronic nose proved the odor or note differences between the shoots. Formation materials of various odors or notes from the shoots were verified by HS-SPME-GC-MS. Aldehydes and alcohols in the aroma components were the main kinds of substances contributing to the aroma and strength from the shoots. Obvious green, fresh, tender and juicy, slight sweet and fruity notes from the shoots were the main odors or notes inducing captive giant pandas to selected the shoots for ingesting in preference to other bamboo foods.

Key words: giant panda; bamboo shoot; odor; VOCs; aroma component; electronic nose; HS-SPME-GC-MS

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-05-10

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。

第一作者简介: 杨楠(1965-), 男, 四川省成都人, 大专, 工程师, 主要从事野生动植物资源保护研究。

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。

大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)属我国特有的珍稀哺乳动物之一, 依靠竹子供给营养得以生存与繁衍, 主要采食竹叶、竹秆和竹笋。其中, 竹笋清新嫩脆、营养丰富, 是大熊猫最喜爱的竹类食物。不过, 并非所有竹子种类的笋子都为圈养大熊猫所采食^[1,2]。雷竹笋和斑竹笋为圈养大熊猫喜食, 属人工饲养条件下的常喂竹笋^[2,3]。一些科技工作者分析

过斑苦竹笋^[4]、毛竹笋^[5,6]、发酵毛竹笋^[7,8]、腌制大叶麻竹笋^[9]和麻竹笋^[10]等的挥发性成分,均从人们的食用角度来研究鲜笋及其加工过程中风味变化规律。迄今为止,未在中国知网上查到雷竹笋和斑竹笋有关气味特点和香气成分方面的文献报道。本文通过圈养大熊猫喜食的 2 种竹笋饲喂试验,观察大熊猫自由选择竹笋的采食行为,采集供试竹笋样品,专业品评人员对竹笋样品进行嗅感品鉴和评价,顶空(HS)—固相微萃取(SPME)—气相色谱(GC)—质谱(MS)联用法分析竹笋样品散发出的 VOCs(挥发性有机物)和香气成分,旨在探寻大熊猫采食竹类食物气味机理^[11,12]的同时,挖掘大熊猫喜欢的食物气味韵调与物质,为研制大熊猫诱食剂提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试动物

供试大熊猫健康状况良好,日粮由竹子、窝窝头、胡萝卜、苹果等组成,自由采食、饮水,圈内随意活动。试验时段供给供试竹笋、竹秆和竹叶,常规饲养管理。供试大熊猫的基本信息详见表 1。

表 1 供试大熊猫基本信息与 2 种竹笋样品采集情况

序号	大熊猫呼名	性别	谱系号	出生日期		饲喂和采样			竹笋名称
				(年-月-日)	(年-月-日)	日期	大熊猫年龄(岁)	地点	
1	苏星	♂	926	2014-08-03	2019-04-16	5	四川省青神县熊猫馆	雷竹笋	
2	华荣	♂	874	2013-07-18	2019-04-16	6	四川省青神县熊猫馆	雷竹笋	
3	辉辉	♀	835	2012-07-11	2019-05-13	7	四川省阆中市熊猫乐园	斑竹笋	
4	福龙	♂	654	2007-08-23	2019-05-13	12	四川省阆中市熊猫乐园	斑竹笋	

1.2 供试竹笋

供试竹笋包括 2 种:雷竹(*Phyllostachys violascens* 'Prevernalis' S. Y. Chen et C. Y. Yao)笋,来自四川省青神县竹林湿地公园;斑竹(*Phyllostachys bambusoides f. lacrima - deae* Keng f. et Wen)笋,来自四川省阆中市清泉乡一农户的竹林。供试竹笋名称、饲喂日期、地点、所喂大熊猫详见表 1。饲喂和采样之日上午从竹林砍取供试竹笋,在自然气温条件下运送,尽快饲喂,其中雷竹笋在四川省青神县熊猫馆的饲喂时段为当日上午 9:30—11:30,因距笋源地较远和道路崎岖,斑竹笋在四川省阆中市熊猫乐园的饲喂时段为当日下午 13:30—17:30。

1.3 样品采集、制备与保存

将砍回的大小相近的供试竹笋随机分成 2 份,一份用于饲喂大熊猫,另一份用作样品。剥离样品竹笋的箨壳,随机从多个部位切取笋片,混合,再随机抽取一部分笋片制成约 3cm 长、火柴棍粗细的样品用于 VOCs 分析,另一部分笋片制成黄豆粒大小

的样品用于电子鼻测试和专业人员的嗅感品评。采样和制样过程中用具和用品洗净无味,并防止其他气味混入样品。样品在内置冰袋的保温箱(桶)中运输,制好的样品密封保存于 -20℃ 的冰箱中。

1.4 大熊猫的自由选择采食试验

先将新鲜的 3 种可食竹秆和 2—3 种可食竹叶和 1 种供试竹笋摆放于固定投食的食台上,然后从隔离圈中放出大熊猫,大熊猫可在多种竹类食物之间根据自己对食物风味的偏好程度,自由地选择采食顺序先后和数量多少。通过监控设备或摄像机从多个角度记录大熊猫的自由选择采食过程,可在监控室观察采食现场,也可此后仔细观看备份的录像,便于整理、分析其采食行为和数据。在四川省青神县熊猫馆,除雷竹笋外的其他可食竹类食物有硬头黄竹(*Bambusa rigida*)、清甜竹(*Dendrocalamus sapidus*)和孝顺竹(*Bambusa multiplex*)的秆与叶;在四川省阆中市熊猫乐园,除斑竹笋外的其他可食竹类食物有斑竹、麻竹(*Dendrocalamus latiflorus*)和慈竹(*Bambusa emeiensis*)的秆、斑竹和麻竹的叶,试验时段间歇性追加饲喂竹笋 3 次,视竹笋大小每次给每只大熊猫投喂 1—2 根,以确认大熊猫在多种竹秆和竹叶的食物条件下是否优先选择竹笋采食。

1.5 嗅感品评方法

由从事饲料或食品调味剂工作多年的 8 名专业人员(其中女性 3 名)组成气味品鉴和评价小组,平均年龄 47.5 岁,均无鼻腔疾病和临床感冒症状。嗅感品评用样 2.0g,方法参照相关文献^[13]。

1.6 仪器与分析方法

PEN 3 型电子鼻由德国 Aisense 公司出品,内置 10 个不同的金属氧化物传感器,分别响应的挥发性物质类别同文献^[14]。电子鼻测试用样 2.0g,具体方法参照文献^[14]。75 μ m CAR/PDMS 型 SPME 纤维头与手动进样手柄由美国 Supelco 公司出品,20 mL 顶空瓶及其相应的密封垫和铝盖、HP-INNOWax 型石英毛细管色谱柱(30m \times 0.25mm \times 0.25 μ m)和 Agilent 7890B-5977B 型 GC-MS 联用仪均由美国 Agilent 公司出品;HS-SPME 用样约 5.0g,在 70℃ 下顶空萃取 1h,此外其他 HS-SPME-GC-MS 联用的具体方法参照文献^[13-15]。

2 结果及分析

2.1 2 种供试竹笋的大熊猫自由选择采食试验

根据四川省青神县熊猫馆和四川省阆中市熊猫乐园 2 个大熊猫场馆的饲喂试验现场观察和实时录

像回放分析,受试大熊猫采食供试竹笋的主要行为流程为:嗅闻→前掌握起竹笋→用嘴剥去笋壳→咬切笋肉→咀嚼→吞咽。由此可知,受试大熊猫摄食竹笋前首先要嗅闻竹笋的气味韵调,预判确定后才继发采食行为。在2个大熊猫场馆,受试大熊猫均率先全部食完所喂供试竹笋,说明雷竹笋和斑竹笋散发出的气味韵调均为受试大熊猫所熟悉并认知安全,是决定受试大熊猫摄食的关键性食源因素。

在四川省青神县熊猫馆同时提供3种可食竹秆、3种可食竹叶和雷竹笋的条件下,大熊猫“苏星”和“华荣”经嗅闻后均优先选择雷竹笋摄食。在四川省阆中市熊猫乐园同时提供3种竹秆、2种竹叶和斑竹笋的条件下,大熊猫“辉辉”和“福龙”经嗅闻后也都是优先选择斑竹笋摄食;大熊猫正在取食竹秆或竹叶时,临时补给斑竹笋,大熊猫放下竹秆或竹叶不食,改食斑竹笋。上述自由选择采食试验表明这2种竹笋深受圈养大熊猫喜食,散发出的气味韵调要比其他所喂竹秆和竹叶更具诱食性。

2.2 2种供试竹笋的气味特点描述

每个专业品评人员分别对雷竹笋和斑竹笋样品进行独立的嗅感品鉴和评价,嗅辩结果汇总如下:这2种竹笋的气味总体上均清新、浓郁、飘移、强度较高、扩散性和愉悦度都较好,特征性香气突出,有多种韵调,属复合型气味,青香、新鲜感、嫩感和水润多汁感相对明显,略带甜气和果香,具有微弱的木质气息、草叶香和壤香。有人从雷竹笋样品中还品出了微微的花香气息,也有人从斑竹笋样品中还嗅辩出微微的油脂气息和药味。经2种竹笋样品相互对照品评,雷竹笋的青香浓度和清新感强于斑竹笋,在愉悦度方面雷竹笋略好于斑竹笋。可见这2种竹笋的气味之间相似之处居多,但也存在某些细微的差异。受试大熊猫嗅闻这2种竹笋后都迅速采食的事实说明供试竹笋的气味是大熊猫喜欢的食物气味,能够诱导大熊猫采食。

2.3 2种供试竹笋的电子鼻测试

电子鼻测试能客观地反映被测样品之间在整体气味信息上的异同。雷竹笋和斑竹笋的样品均以测试稳定阶段的电子鼻响应值进行如下信息数据分析。主成分分析(PCA)^[14]结果见图1,线性判别分析(LDA)^[14]结果见图2。

从图1和图2可知,PCA分析和LDA分析的结果均显示雷竹笋和斑竹笋的信息数据所在区域相隔都有一定距离,说明这2种竹笋的整体气味信息相互之间存在一定差异,预示雷竹笋和斑竹笋散发

的气味韵调及其强度可能有所不同,与上述专业品评人员的嗅感结果大体相符,同时表明可用电子鼻的PCA分析或LDA分析能将雷竹笋和斑竹笋散发出的气味信息予以准确区分。

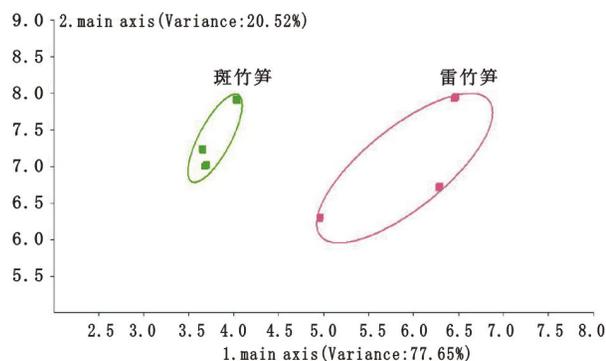


图1 雷竹笋和斑竹笋的电子鼻PCA分析

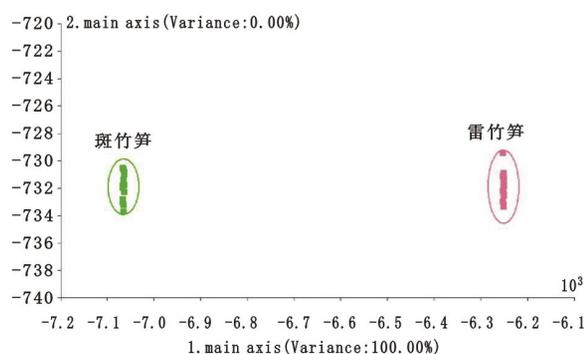


图2 雷竹笋和斑竹笋的电子鼻LDA分析

传感器载荷分析(LA)^[14]结果见图3。从图3可知,对第一主成分(PC1)贡献较大的传感器为R₆,其他依次为R₈和R₂;对第二主成分(PC₂)贡献较大的传感器为R₇,其他依次为R₂和R₅。根据电子鼻的传感器对挥发性物质类别的特殊灵敏性^[14]可知:雷竹笋和斑竹笋之间的气味差异可能由于甲基类、萜烯类、醇类、醛类、酮类、氮氧化物、短链烷烃和芳香型化合物的不同而引起。

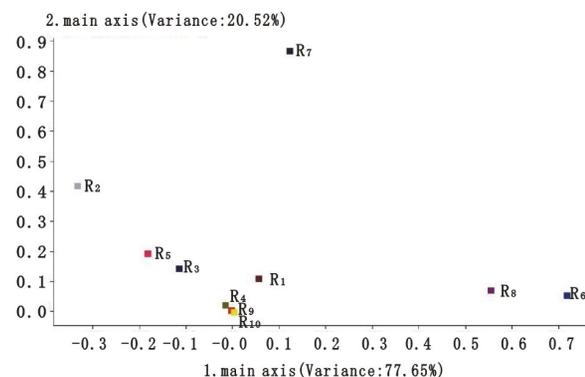


图3 雷竹笋和斑竹笋的电子鼻传感器LA分析

2.4 2种供试竹笋中的VOCs和香气成分

经HS-SPME-GC-MS联用法分析,雷竹笋和斑竹笋挥发出来的VOCs测定结果见图4、图5和表2。

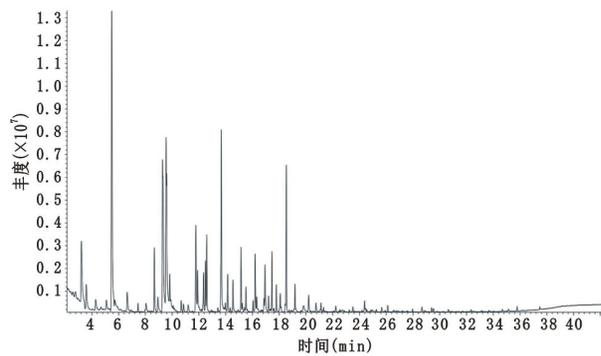


图4 圈养大熊猫“苏星”和“华荣”所食雷竹笋的 VOCs 总离子流色谱图

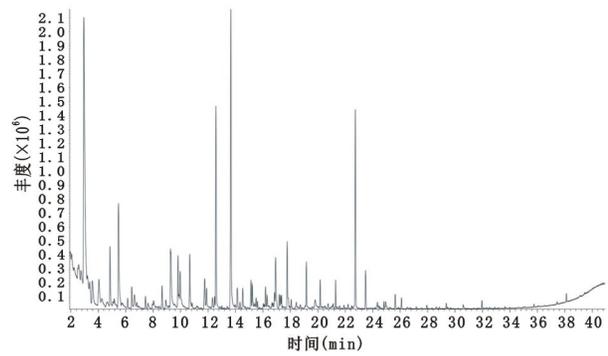


图5 圈养大熊猫“辉辉”和“福龙”所食斑竹笋的 VOCs 总离子流色谱图

表2 圈养大熊猫所食2种竹笋的 VOCs

序号	VOCs 名称	雷竹笋			斑竹笋			主要相关的气味韵调 ^[16-18]
		保留时间 (min)	匹配度 (%)	相对含量 (%)	保留时间 (min)	匹配度 (%)	相对含量 (%)	
1	2-甲基呋喃※	—	—	—	2.584	87	1.74	辛辣、烟熏味
2	2-甲基丁醛※	2.754	91	0.49	—	—	—	果香、霉香、坚果、巧克力、麦芽香气
3	3-甲基丁醛※	—	—	—	2.750	80	1.32	尖刺的、青香、巧克力样香气
4	乙醇△	—	—	—	2.957	91	22.72	酒的气味
5	2-乙基呋喃※	3.223	90	4.87	—	—	—	豆香、面包、麦芽、溶剂样、焦糊香气
6	2-甲基丙酸乙酯※	—	—	—	3.370	91	—	甜的、水果、黄油、老姆酒香气
7	戊醛※	3.586	91	1.67	—	—	—	令人愉快的、面包、巧克力香气
8	2-甲基丁酸甲酯※	—	—	—	4.051	81	2.07	甜的、醚香、水果、蜜饯、冰淇淋、青香香气
9	2-丁烯醛△	4.669	91	—	—	—	—	—
10	2-甲基丁酸乙酯※	—	—	—	4.859	97	2.28	甜的、青香、水果、草莓、浆果香气
11	2,3-戊二酮※	5.082	87	0.49	—	—	—	脂肪、奶油、黄油、坚果、烤香、焦糖香气
12	3-甲基丁酸乙酯※	—	—	—	5.171	91	—	甜的、水果、菠萝、浆果、青香、酯香
13	己醛※	5.490	96	16.85	5.476	96	5.27	强烈的、青香、木香、草香、蔬菜、肉香、水果香气
14	3-戊醇△	—	—	—	6.146	86	0.35	—
15	2-戊醇※	—	—	—	6.420	83	0.76	挥发性的、水果、葡萄酒、杂醇油香气
16	反式-2-戊烯醛△	6.648	94	1.13	6.642	93	0.71	尖刺的、青香、苹果、柑橘、土豆香气
17	1,2-二甲基苯	—	—	—	6.813	95	—	—
18	3-甲基-2-丁烯酸甲酯	—	—	—	7.614	91	—	—
19	2-庚酮※	7.968	91	—	—	—	—	水果、青香、奶油、奶酪香气
20	庚醛※	8.049	97	0.46	8.042	83	—	柑橘、脂肪、青香、坚果香气
21	3-甲基-1-丁醇※	8.672	86	2.37	8.658	90	0.91	令人愉快的、威士忌、香蕉、苹果香气
22	反式-2-己烯醛※	8.939	98	0.86	8.928	98	0.55	青香、苹果、脂肪、青草、新鲜绿叶等香气
23	2-乙基呋喃※	9.288	94	10.38	9.274	94	4.58	果香、青香、壤香、根香等香气
24	1-戊醇※	9.822	86	1.88	9.813	86	2.00	苹果、香蕉、酵母、酒香香气
25	3-辛酮※	—	—	—	9.886	87	0.46	甜的、水果、青香、壤香、蘑菇、奶酪香气
26	苯乙烯※	—	—	—	9.971	94	2.54	甜的、花香等气味
27	反式-7-甲基-1,6-二氧杂螺环[4.5]癸烷	10.680	93	0.46	10.669	83	2.03	—
28	辛醛※	10.856	95	0.35	10.843	81	—	柑橘、脂肪、青香、蜜香等香气
29	1-辛烯-3-酮※	11.182	81	0.45	—	—	—	壤香、蘑菇香
30	顺式-2-(2-戊烯基)呋喃	11.247	92	—	—	—	—	—
31	反式-2-戊烯-1-醇	11.515	80	—	—	—	—	—
32	反式-2-庚烯醛※	11.777	97	3.71	11.755	96	1.53	青香、果香、脂肪等香气
33	2,3-辛二酮※	—	—	—	11.873	86	0.96	青香、甜的奶油香
34	1-甲酰吡咯烷	11.906	80	2.05	—	—	—	—
35	6-甲基-5-庚烯-2-酮※	12.172	91	—	—	—	—	水果、苹果、奶油、脂肪、青香、柑橘香气
36	甲氧基苯※	—	—	—	12.300	87	—	甜的茴香样香气
37	2-乙基-1,6-二氧杂螺环[4.4]-壬烷	12.496	95	3.22	12.483	97	0.38	—
38	1-己醇※	12.588	90	2.57	12.579	90	7.07	脂肪、水果、青香、草香、木香、甜的、嫩枝叶气息、微带酒香
39	顺式-3-己烯-1-醇※	13.421	95	—	—	—	—	青叶、青香、青草、青水果等香气
40	反式-3-己烯-1-醇※	—	—	—	13.390	90	—	青香、草青香气

(续表 2)

序号	VOCs 名称	雷竹笋			斑竹笋			主要相关的气味韵调 ^[16-18]
		保留时间 (min)	匹配度 (%)	相对含量 (%)	保留时间 (min)	匹配度 (%)	相对含量 (%)	
41	3-辛醇※	13.682	83	7.36	13.669	83	11.62	青香、蘑菇、木香、辛香、薄荷香气
42	3-辛烯-2-酮※	13.983	93	0.39	13.972	86	—	壤香、蘑菇、肉、椰子香气
43	反式-3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	14.167	91	1.55	14.138	86	0.93	
44	反式-2-辛烯醛※	14.549	97	1.24	14.534	91	0.77	尖刺的脂肪、肉香、青香气
45	1-辛烯-3-醇※	15.152	90	1.96	15.136	90	0.94	壤香、蘑菇、真菌、油腻、青香、蔬菜、肉香气
46	1-庚醇※	15.242	90	0.29	15.234	91	0.91	青香、木香、脂肪等香气
47	反式-5-乙基-6-甲基-3-庚烯-2-酮	15.416	87	—	—	—	—	
48	反式,反式-2,4-庚二烯醛※	16.209	94	2.86	16.196	95	1.16	青香、脂肪、水果、辛香香气
49	癸醛※	16.323	97	0.80	16.286	80	0.60	甜的、醛香、蜡香、脂肪、柑橘香气
50	3,5-辛二烯-2-酮△	16.868	81	0.41	—	—	—	
51	苯甲醛※	16.944	96	2.15	16.929	96	2.37	杏仁、果香、粉香、坚果香气
52	反式-2-壬烯醛※	17.211	80	0.53	17.197	90	0.48	鸡、烤猪肉、黄瓜、甜瓜、脂肪、青香、蜡香、蔬菜香气
53	亚苄基二甲酰胺△	—	—	—	17.292	87	0.49	甜的、花香、青香、酒香、水果、杏仁香气
54	1-十五烯	17.457	99	1.75	—	—	—	
55	1-辛醇※	17.789	91	0.89	17.774	91	2.59	青香、柑橘、甜橙、醛香、甜花香、蜡香香气
56	反式,反式-3,5-辛二烯-2-酮※	18.082	87	0.93	—	—	—	青香、尖刺的草药气味
57	反式,顺式-2,6-壬二烯醛※	18.451	80	—	—	—	—	脂肪、青香、辛香、甜瓜、黄瓜、蔬菜香气
58	β-石竹烯※	18.537	99	5.06	—	—	—	木香、辛香、藜样香气
59	苯乙醛※	19.836	94	0.61	19.811	94	0.72	甜的、青香、花香、玫瑰、壤香、巧克力香气
60	1-壬醇※	20.172	87	0.72	20.180	91	0.85	脂肪、柑橘香气
61	顺式-3-壬烯-1-醇△	20.750	86	0.45	—	—	—	新鲜、蜡香、青香、甜瓜、蘑菇香气
62	反式,反式-2,4-壬二烯醛※	21.127	94	0.41	—	—	—	脂肪、青香、腥、油腻香气
63	萘	—	—	—	21.908	90	—	
64	戊酸※	22.078	86	—	—	—	—	强烈的、尖刺的、奶酪、酸奶、烟草、水果香气
65	1-癸醇※	—	—	—	22.470	91	—	花香、蜡香、脂肪、油脂等香气
66	水杨酸甲酯※	—	—	—	22.737	96	7.20	甜的、菜根汽水、冬青特征香气
67	反式,反式-2,4-癸二烯醛※	23.515	95	0.19	—	—	—	脂肪、鸡油、柑橘、芫荽、鸡肉特征香气
68	水杨酸乙酯※	—	—	—	23.483	94	1.25	甜的、冬青、凉香、辛香、花香、水果香气
69	1-甲基萘※	—	—	—	24.296	90	—	壤香、酚样、类似萘、樟脑香气
70	己酸※	24.379	90	0.28	24.341	90	—	强烈的、腐臭奶酪、酸香气
71	香叶基丙酮※	24.456	92	—	—	—	—	青香、新鲜花香、水果等香气
72	苯甲醇※	24.969	97	—	24.943	97	—	甜的、花香、果香香气
73	反式,反式,顺式-2,4,6-壬三烯醛	25.267	95	—	—	—	—	
74	苯乙醇※	25.665	94	—	25.642	94	0.55	甜的、青香、花香、玫瑰、面包、壤香香气
75	β-紫罗兰酮※	26.120	98	0.21	26.098	96	0.35	甜的、木香、果香、花香、紫罗兰样香气
76	辛酸※	28.665	96	0.23	28.615	83	—	奶酪、脂肪、草香、油脂、果酸等香气
77	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮	29.392	95	—	29.366	95	—	
78	N-乙酰基-L-异亮氨酸甲酯	—	—	—	29.466	86	—	
79	雪松醇△	29.536	96	—	—	—	—	弱木香带些膏香
80	壬酸※	30.651	87	—	30.605	83	—	脂肪、蜡、奶酪、椰子香气
81	十六酸乙酯※	—	—	—	31.958	99	0.21	蜡香、水果、牛奶、奶油、香脂香气
82	癸酸※	32.347	94	—	32.301	90	—	脂肪、腐臭气味
83	邻苯二甲酸二乙酯	—	—	—	33.650	96	—	
84	吡啶※	34.676	91	—	—	—	—	温和的动物粪便气味,低浓度时呈茉莉花香
85	十二酸※	35.138	93	—	—	—	—	非常弱的脂肪香气
86	邻苯二甲酸反式-3-己烯基丁酯	35.785	90	—	—	—	—	
87	邻苯二甲酸二丁酯	37.477	94	—	—	—	—	
88	十二酰胺	—	—	—	38.119	86	0.23	
	成分种数或相对含量合计		62	85.53		59	94.45	

注:未列出匹配度 < 80% 的 VOCs 名称及其相对含量,“※”表示我国和/或欧盟、美国、日本法规许可添加的食品级单体呈香物质;“—”表示仪器未检出或虽检出但匹配度 < 80% 的香气成分或仪器未自动算出;“△”表示我国《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而欧盟和/或美国、日本法规却许可添加的单体呈香物质。

由图 4、图 5 和表 2 可知,从雷竹笋和斑竹笋中分别测出了 62 种和 59 种 VOCs,总共测出了 88 种 VOCs。其中,相同的 VOCs 有 33 种,分别占这 2 种竹笋 VOCs 总数的 53.23% 和 55.93%,可见一半以上的 VOCs 是相同的。可推知这 2 种竹笋可能具有一些相同或相近的气味韵调,其他互不相同的 55 种 VOCs 可能增强或减弱这 2 种竹笋中某些相同气味

韵调的强度,也可能导致这 2 种竹笋间某些气味韵调的不同。

以上 VOCs 的异同表明这 2 种竹笋间某些气味韵调的异同和强度的差异均有物质基础的,与专业品评人员的嗅感结果基本相符。根据表 2 的原始测定数据,按 VOCs 所属有机化合物类别,归类统计结果见表 3。

表 3 2 种供试竹笋中的 VOCs 类别及其成分种数和相对含量统计

供试竹笋名称	项目	烯烃类	芳烃类	醇类	醚类	醛类	酮类	羧酸类	酯类	杂环类	酰胺类	合计
雷竹笋	成分数量(种)	3	—	14	—	19	11	6	2	7	—	62
	相对含量(%)	8.36	—	18.49	—	34.31	2.88	0.51	—	20.98	—	85.53
斑竹笋	成分数量(种)	2	3	15	2	14	5	4	9	4	1	59
	相对含量(%)	3.47	—	51.27	0.49	15.48	1.77	0	13.01	8.73	0.23	94.45

注: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%。“—”表示仪器未检出或未自动算出。

由表 3 可知,从雷竹笋中测出了 7 个类别的 VOCs,而从斑竹笋中测出了 10 个类别的 VOCs,这 2 种竹笋在每个 VOCs 类别的成分种数和相对含量方面存在或多或少的差异,与电子鼻测试结果大致相符,预示这 2 种竹笋的某些气味韵调及其强度存在一定程度的异同。

竹笋的气味韵调主要与 VOCs 中的典型呈香成分(食品级单体呈香物质,即本文所指的香气成分)有关。雷竹笋和斑竹笋中的香气成分见表 2 中 VOCs 名称后面带※和△者。由表 2 可知,从这 2 种竹笋中分别测出了 50 种和 49 种香气成分,其中测出的共同香气成分有 29 种,分别是:己醛、反式-2-戊烯醛、庚醛、3-甲基-1-丁醇、反式-2-己烯醛、2-戊基呋喃、1-戊醇、辛醛、反式-2-庚烯醛、1-己醇、3-辛醇、3-辛烯-2-酮、反式-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、1-庚醇、反式,反式-2,4-庚二烯醛、癸醛、苯甲醛、反式-2-壬烯醛、1-辛醇、苯乙醛、1-壬醇、己酸、苯甲醇、苯乙醇、β-紫罗兰酮、辛酸、壬酸、癸酸。在这 29 种共同的香气成分中,从表 2 中单一香气成分的主要相关气味韵调^[16-18]可知,赋予这 2 种供试竹笋青香气味的香气成分有己醛、反式-2-戊烯醛、庚醛、反式-2-己烯醛、2-戊基呋喃、辛醛、反式-2-庚烯醛、1-己

醇、3-辛醇、反式-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、1-庚醇、反式,反式-2,4-庚二烯醛、反式-2-壬烯醛、1-辛醇、苯乙醛、苯乙醇等 17 种,赋予竹笋甜气的有 1-己醇、癸醛、1-辛醇、苯乙醛、苯甲醇、苯乙醇、β-紫罗兰酮等 7 种,赋予竹笋果香韵调的(包括水果和苹果香韵)有己醛、反式-2-戊烯醛、3-甲基-1-丁醇、反式-2-己烯醛、2-戊基呋喃、1-戊醇、反式-2-庚烯醛、1-己醇、反式,反式-2,4-庚二烯醛、苯甲醛、苯甲醇、β-紫罗兰酮等 12 种,赋予竹笋木质气息的有己醛、1-己醇、3-辛醇、1-庚醇、β-紫罗兰酮等 5 种,赋予竹笋草叶香气的有己醛、反式-2-己烯醛、1-己醇、辛酸等 4 种,赋予竹笋壤香的有 2-戊基呋喃、3-辛烯-2-酮、1-辛烯-3-醇、苯乙醛、苯乙醇等 5 种,竹笋的新鲜感可能与己醛、反式-2-己烯醛、1-辛醇等有关,嫩感可能与 1-己醇等有关,水润多汁感可能与竹笋的水分含量高有关,以上说明专业品评人员的嗅感结果是有具体香气成分支撑的。竹笋散发出的某种气味韵调是由竹笋中的多种香气成分经协同增效或抵消减弱等相互作用后呈现的某种嗅觉最终感受,其强弱与正负效应的香气成分的种数和浓度相关。2 种供试竹笋中香气成分的有机化合物类别及其成分种数和相对含量统计结果见表 4。

表 4 2 种供试竹笋中香气成分的有机化合物类别及其成分种数和相对含量

供试竹笋名称	项目	烯烃类	芳烃类	醇类	醚类	醛类	酮类	羧酸类	酯类	杂环类	合计
雷竹笋	成分数量(种)	1	—	13	—	18	9	6	—	3	50
	相对含量(%)	5.06	—	18.49	—	34.31	2.88	0.51	—	15.25	76.50
斑竹笋	成分数量(种)	1	1	15	2	14	4	4	6	2	49
	相对含量(%)	2.54	—	51.27	0.49	15.48	1.77	—	13.01	6.32	90.88

注: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。“—”表示仪器未检出或未自动算出。

由表 4 可知,从雷竹笋中测出了 6 个有机化合物类别、共 50 种香气成分;而从斑竹笋中测出了 9

个有机化合物类别、共 49 种香气成分,比雷竹笋多出了芳烃类、醚类、酯类 3 个有机化合物类别,说明这 2 种供饲竹笋中的香气成分类别有异同之处。无论是香气成分种数还是相对含量,醛类和醇类均为雷竹笋和斑竹笋中最主要的 2 个有机化合物类别,这 2 类香气成分种数之和在各自总数中占比分别为 62.00% 和 59.18%,相对含量之和在各自总量中占比分别为 69.02% 和 73.45%,说明醛类和醇类为这 2 种竹笋中香气韵调及其强度的主要贡献物质类别。从表 2 中雷竹笋和斑竹笋共同的 29 种香气成分和单一香气成分的主要相关气味韵调^[16-18]可知,这 2 种竹笋某种气味韵调的主要相关成分并非只有 1 个有机化合物类别,而是有多个有机化合物类别。如:具有青香韵调的香气成分有机化合物类别主要有醇类、醛类、杂环类等;具有甜气韵调的香气成分有机化合物类别主要有醇类、醛类、酮类等;具有果香(包括水果和苹果)韵调的香气成分有机化合物类别主要有醇类、醛类、酮类、杂环类等;具有木香气息的香气成分有机化合物类别主要有醇类、醛类、酮类等;具有草叶香韵调的香气成分有机化合物类别有醇类、醛类、羧酸类等;具有壤香韵调的香气成分有机化合物类别主要有醇类、酮类、杂环类等;具有新鲜感韵调的香气成分有机化合物类别可能有醇类、醛类等;具有嫩感韵调的香气成分有机化合物类别可能有醇类等。

某种气味韵调的强弱与有关香气成分的数量和含量直接相关。青香方面,雷竹笋中测出了 25 种相关香气成分(详见表 2),相对含量合计为 53.84%;而斑竹笋中也测出了 25 种相关香气成分,但相对含量合计为 47.03%,预示雷竹笋的青香气味比斑竹笋强。在新鲜感方面,雷竹笋中测出了 3 种相关香气成分,相对含量合计为 1.31%;而斑竹笋中只测出了 1 种相关香气成分,相对含量合计仅为 0.55%,预示雷竹笋的新鲜感比斑竹笋好些。在愉悦度方面,若以圈养大熊猫喜欢的苹果气味为参考标准,雷竹笋中测出了 5 种相关香气成分,相对含量合计为 6.24%;而斑竹笋中测出了 4 种相关香气成分,相对含量合计为 4.17%,预示雷竹笋的愉悦度比斑竹笋好些。以上的数据和推测与专业品评人员的嗅感结果一致,或者说专业人员的品评结果是有香气成分种数和相对含量支撑的。

3 讨论

3.1 大熊猫喜欢竹笋的香气韵调

野生大熊猫在竹子发笋期优先采食竹笋,随不同海拔高度的发笋时间先后而迁徙追逐,呈现出“撵笋”现象^[3];大熊猫在人工饲养条件下也是优先于竹秆和竹叶而选食竹笋,足以说明竹笋为大熊猫所喜爱。就主要依靠嗅觉觅食^[19-21]的植食性大熊猫而言,食物散发出的气味是否为自己所熟悉并认知安全对于决定是否摄食来说显得尤为重要,可见大熊猫喜食的食物具有如下属性:食物气味的诱食性强,食物的适口性(包括味道、质地等)好。若以气味发生源来具体命名某种物体的气味,那么竹笋散发出的多种气味韵调可以统称为竹笋香。整体上,竹笋香不同于竹秆香^[11]和竹叶香^[12],但三者之间也有一些相同或相近的气味韵调。上述专业品评人员的嗅感结果表明,竹笋香含有多种气味韵调,包括新鲜感、嫩感、水润多汁感、青香、甜气、果香、木质气息、草叶香、壤香,这些气味韵调和互不相同的浓度组合在一起形成了竹笋特征性的气味。青香、甜气、新鲜感等气味韵调呈现于大熊猫乳汁中^[22],成为大熊猫从小就熟知安全的食物气味韵调。圈养大熊猫喜食的补饲奶粉^[14]、新鲜苹果^[23]、新鲜胡萝卜^[23]、新鲜玉米秸秆^[13]都存在着明显的甜气和青香等气味韵调。不常喂给圈养大熊猫的佛肚竹秆、毛竹秆、牛儿竹秆、硬头黄竹秆、清甜竹秆、孝顺竹秆均有新鲜感、青香、甜气等气味韵调^[11],毛竹叶、牛儿竹叶、硬头黄竹叶、清甜竹叶、孝顺竹叶都散发出青香、叶香、草香、甜气、新鲜感、嫩气等气味韵调^[12]。综上所述,竹笋香中的青香、甜气、新鲜感是大熊猫喜欢的香气韵调。

3.2 实际应用建议

根据上述研究结果,本文提出如下建议:①可在大熊猫饲养单位附近适宜区域人工栽培雷竹、斑竹等竹种,在每年发笋时节,现砍现喂,便于为圈养大熊猫提供美味佳肴,阶段性改善食物结构,以提高圈养大熊猫的生活福利。②在研制大熊猫诱食剂时,以大熊猫喜欢的竹笋香为参照目标进行调香,调香时可以从表 2 VOCs 名称后面带※号者的香气成分中选择相应的食品级单体呈香物质,并酌情酌量考虑使用。但应注意的是我国法规不允许在各类食品加工过程中使用乙醇(可用作加工助剂)、2-丁烯醛、3-戊醇、反式-2-戊烯醛、3,5-辛二烯-2-酮、亚苄基二甲醚、顺式-3-壬烯-1-醇、雪松醇 8 种单体合成香料。③若储藏备用的竹笋,特别是储藏时间较长的竹笋,在喂给大熊猫前最好先将竹笋的两端除去一小段,不仅可以检查竹笋是否发

霉变质,而且还利于竹笋气味的散发,展现竹笋气味韵调的诱食性。

4 结论

在同时提供3种可食竹秆、2-3种可食竹叶、1种供试竹笋的条件下进行圈养大熊猫自由选择采食试验,结果表明:受试大熊猫在嗅闻雷竹笋或斑竹笋之后均优先于其他竹类食物选择供试竹笋采食,而且喜食,这2种供试竹笋散发出的气味要比其他所喂可食竹秆和竹叶的气味更具诱食性。专业品评人员的嗅感结果表明,雷竹笋和斑竹笋的气味总体上均清新、浓郁、飘移、强度较高、扩散性和愉悦度都较好,特征性竹笋香突出,均有多种韵调,属复合型气味,相同之处在于青香、新鲜感、嫩感和水润多汁感相对明显,略带甜气和果香,具有微弱的木质气息、草叶香和壤香,不同之处在于这些气味韵调的相对强度大小或有花香气息、油脂气息、药味等其他细微的韵调。电子鼻测试的结果证明了这2种竹笋间气味韵调的差异性,可通过PCA分析或LDA分析予以准确区分。经HS-SPME-GC-MS联用法测定,雷竹笋中共发现50种香气成分,归类为醛18种、醇13种、酮9种、羧酸6种、杂环化合物3种、烯炔1种;斑竹笋中共发现49种香气成分,归类为醇15种、醛14种、酯6种、酮和羧酸各4种、醚和杂环化合物各2种、烯炔和芳炔各1种;醛类和醇类香气成分是这2种竹笋中香气韵调及其强度的主要贡献物质类别,证实了这2种竹笋中多种气味韵调形成的物质基础。竹笋中明显的青香、新鲜感、嫩感、水润多汁感、轻微的甜气和果香等可能是诱导圈养大熊猫优先选择雷竹笋或斑竹笋采食的主要气味韵调。

(致谢:峨眉山生物资源实验站的李策宏工程师核定供试竹笋所属竹种名称,陈绪玲工程师辅助竹种核名,青神县熊猫馆杨平同志参加了雷竹笋的大熊猫饲喂试验,阆中市熊猫乐园廖荣同志参加了斑竹笋的大熊猫饲喂试验,西华大学食品与生物工程学院的包清彬教授、西南科技大学生命科学与工程学院的曾凡坤教授、成都大帝汉克生物科技有限公司的李松柏高级工程师、黄明亚工程师、刘张育工程师参加了嗅感品评,喻麟董事长和李小兵总经理给予了支持,江南大学食品学院的向琴博士生参加了电子鼻测试,中国科学院成都分院分析测试中心的胡静副研究员在挥发性成分分析与推定方面提供了帮助,在此一并深表谢意!)

参考文献:

- [1] 李小娟. 大熊猫潜在喜食竹营养价值评定及其利用效率[D]. 杭州: 浙江农林大学硕士学位论文, 2012.
- [2] 陈亚, 张贵权, 陈绪玲. 峨眉山地区多种竹笋饲喂大熊猫的观察试验[J]. 四川林业科技, 2014, 35(3): 51-53.
- [3] 李明喜, 黄祥明, 王成东, 等. 圈养大熊猫常用竹笋营养研究[J]. 野生动物学报, 2018, 39(1): 12-18.
- [4] 夏勃. 斑苦竹笋(*Arundinaria oleosa*)营养成分和化学成分分析[D]. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2006.
- [5] 杨金来, 吴良如, 杨慧敏, 等. 竹笋化学成分研究进展[J]. 竹子学报, 2017, 36(3): 72-76.
- [6] 董文慧, 孙春娃, 丁兴萃, 等. 电子鼻结合顶空 SPME-GC-MS 分析毛竹冬笋的挥发性成分[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(3): 685-691.
- [7] 李梅, 陶璇, 王冲, 等. 不同处理方式下毛竹笋发酵过程中品质变化分析[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6): 142-147.
- [8] 蔡珩, 杜玫, 贾利蓉, 等. 毛竹笋发酵过程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品科技, 2021, 46(1): 87-93.
- [9] 周春红. 大叶麻竹笋腌制加工过程中品质变化的研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 郑炯, 宋家芯, 陈光静, 等. 顶空-固相微萃取-气质联用法分析腌制麻竹笋挥发性成分[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 193-196.
- [11] 鲜义坤, 王慧, 李松柏, 等. 圈养大熊猫选择6种竹秆采食的气味机理初探[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(12): 1395-1403.
- [12] 杨楠, 林俊帆, 刘张育, 等. 圈养大熊猫选择5种竹叶采食的气味机理初探[J]. 特产研究, 2021, 43(2): 17-31.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 孙宝国, 刘玉平. 食用香料手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [17] 孙宝国, 何坚. 香料概论(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [18] George A. Burdock. Fenaroli's Handbook of Flavor Ingredients[M]. Florida: CRC Press, 2010.
- [19] 胡锦涛. 大熊猫的摄食行为[J]. 生物学通报, 1995, (9): 14-18.
- [20] 汤纯香. 大熊猫采食行为的研究[J]. 动物学杂志, 1992, 21(4): 46-49.
- [21] 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.
- [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] 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.