基于GC-MS和电子感官技术分析发芽对黑麦茶风味的影响

陆晨浩，王曦如，仲梦涵，郝怡宁，陈尚兵，王玉环，邢常瑞，袁　建*
（南京财经大学食品科学与工程学院，江苏 南京　210023）

摘　要：采用电子鼻、电子舌与气相色谱-质谱联用技术相结合，并采用保留指数进行定性，对发芽黑麦茶风味物质进行分析。结果表明：与未发芽相比，发芽的黑麦茶风味具有明显变化，电子舌显示苦味、酸味均有所下降，在第3天最低；挥发性成分上，香气组分醛类、酮类、酚类总相对含量在发芽第3天达到最大，分别比未发芽增加22.09%、2.07%、2.75%。香气组分种类第3天比未发芽多13 种。发芽3 d的黑麦茶风味相较于未发芽的黑麦茶的风味具有显著变化。

关键词：电子舌；电子鼻；气相色谱-质谱联用；保留指数；发芽黑麦茶

Effects of Germination on the Flavor of Rye Tea as Evaluated by GC-MS and Electronic Sensor Techniques

LU Chenhao, WANG Xiru, ZHONG Menghan, HAO Yining, CHEN Shangbing, WANG Yuhuan, XING Changrui, YUAN Jian*
(College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing　210023, China)

Abstract: In this study, an electronic nose and an electronic tongue as well as gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were employed to evaluate the flavor compounds of rye tea made from ungerminated and germinated rye seeds. Qualitative analysis was performed based on retention indices. The results showed that the flavor of rye tea apparently changed after germination. The bitter and sour taste detected using the electronic tongue both decreased, reaching the lowest level on the third day of germination. The relative contents of aldehydes, ketones and phenolics contributing to the aroma of rye tea reached the maximum on this day, increasing by 22.09%, 2.07% and 2.75% as compared with those before germination, respectively. A total of 13 aroma components were newly formed in rye tea during the 3-day germination period.

Keywords: electronic tongue; electronic nose; gas chromatography-mass spectrometry; retention index; sprouted rye tea
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190617-174
中图分类号：TS272　　文献标志码：A　　文章编号：1002-6630（2020）10-0192-06
引文格式：
陆晨浩, 王曦如, 仲梦涵, 等. 基于GC-MS和电子感官技术分析发芽对黑麦茶风味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 192-197. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190617-174.　http://www.spkx.net.cn
LU Chenhao, WANG Xiru, ZHONG Menghan, et al. Effects of germination on the flavor of rye tea as evaluated by GC-MS and electronic sensor techniques[J]. Food Science, 2020, 41(10): 192-197. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190617-174.　http://www.spkx.net.cn

黑麦（*Secale cereale* L.）素有“蛋白麦”的美称[1]，相较于大麦与小麦，黑麦中的蛋白含量非常高[2-3]。不仅如此，黑麦还富含阿魏酸、植物甾醇类、黄酮类化合物等植物活性物质[4-5]。目前黑麦功能性食品的开发仅在面包[6]与饼干[7]上应用较多。2018年富硒黑麦茶大量出现，极受消费者青睐，而关于发芽黑麦茶的研究相对较少，发芽黑麦在未出苗时营养倍增，且抗氧化活力提高，发芽后麦芽中增加了可溶性物质，并含较多胡萝卜素与维生素，经酶解可以生成具有甜味的纤维素，增加了适口性，易于消化[8-9]。蒋芮等[10]对黑大麦发芽进行研究，发

收稿日期：2019-06-17
基金项目：“十三五”国家重点研发计划重点专项（2017YFD0401405）；南京财经大学2018年校级教学改革课题（JGZ001）；江苏省研究生实践创新项目（SJCX19_0430）
第一作者简介：陆晨浩（1996—）（ORCID: 0000-0003-0289-4485），男，硕士，研究方向为食品科学。E-mail: 2411262192@qq.com
*通信作者简介：袁建（1965—）（ORCID: 0000-0003-3928-6117），男，教授，本科，研究方向为食品质量安全评价与控制、粮油深加工。E-mail: yjian_nj@163.com

现发芽第2天发芽率达到最高，第3天营养物质含量显著升高，具有开发功能性食品的巨大潜力，所以研究开发发芽黑麦茶具有重要意义。

鉴定茶品质的过程中滋味、香味均为重要指标，其中茶的香味对茶品质的贡献率达25%～40%[11-12]。本实验运用电子鼻与电子舌联用，对发芽黑麦茶的品质进行鉴定。电子鼻通过传感器阵列对茶叶总体气味信息进行反馈[13]。电子舌则能够从酸、甜、苦、咸、鲜这5 种滋味进行模拟并用数据进行反馈，多角度对茶品质进行评定。Mahuya等[14]通过电子鼻、电子舌联用对红茶进行分类并快速检测其品质。Runu等[15]将此技术运用于茶叶品质检测自动化。

为进一步比较发芽黑麦茶香味品质，本实验采用气相色谱-质谱（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）与电子鼻联用，并用保留指数（retention index，RI）进行定性，增加结果准确性。Zhou Xuxia等[16]通过GC-MS与电子鼻联用评价洗涤方法对鲢鱼肉糜香气特性的不同影响。Qiu Shanshan等[17]利用GC-MS对柑橘进行质量检测。

1 材料与方法

1.1 材料

黑麦为2018年新收种子级黑小麦，采自河南省商丘市宁陵县。

1.2 仪器与设备

BEAR智能发芽机 小熊环境电器有限公司；DHG-9140A电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司；ASTREE电子舌、α-FOX3000电子鼻 法国Alpha MOS公司；7890A-5875C GC-MS联用仪 美国安捷伦公司；手动固相微萃取进样器、50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头 美国Supelco公司。

电子鼻和电子舌传感器，如表1、2所示。

表 1 电子鼻传感器阵列性能

Table 1 Performance of electronic nose sensor arrays used in this study

传感器	性能
LY2/LG（s1）	氯、氮氧化合物，氧化分子
LY2/G（s2）	对氨、胺、醇类和酮类物质敏感
LY2/AA（s3）	氨、酮
LY2/GH（s4）	对氨和胺类物质敏感
LY2/gCTL（s5）	对硫化氢敏感
LY2/gCT（s6）	丙烷、丁烷、乙醇
T30/1（s7）	对有机化合物灵敏，极性化合物、氯化氢
P10/1（s8）	烃类
P10/2（s9）	甲烷、丙烷、脂肪酸、非极性分子
P40/1（s10）	氟里昂、氧化分子
T70/2（s11）	对芳香族化合物灵敏
PA/2（s12）	对含氮物质敏感

表 2 电子舌传感阵列性能

Table 2 Performance of electronic tongue sensor arrays used in this study

传感器	AHS（s13）	CTS（s15）	NMS（s16）	ANS（s18）	SCS（s19）
性能	酸	咸	鲜	甜	苦

1.3 方法

1.3.1 发芽黑麦茶样品制备

将黑麦放入水中浸泡8～10 h，取出放入发芽机培养，分别在第1、2、3天取出。将发芽黑麦放入60 ℃烘箱干燥3 h，取出放入180 ℃烘烤机中处理30 min，冷却。

1.3.2 挥发性成分测定

参考陈兵等[18]的方法，稍作修改。称量0.50 g左右的样品装入15 mL萃取瓶中，置于60 ℃恒温水浴锅平衡10 min，插入装有纤维头的手动固相微萃取进样器进行采样，吸附45 min，采样完毕立即进行GC检测，250 ℃解吸3 min。

GC条件：DB-5MS弹性石英毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；载气为He；恒流模式：流速1.7 mL/min；升温程序：初始温度40 ℃，保持5.0 min，以10 ℃/min升至85 ℃，保持3.0 min，以4 ℃/min升温至200 ℃，保持3.0 min，再以10 ℃/min升温至230 ℃，保持1.0 min。

MS条件：电子电离源，正离子模式；电子能量70 eV；离子源温度200 ℃；质量扫描范围*m/z* 35～400；发射电流100 μA；检测电压1.4 kV。

1.3.3 电子鼻测定

取3 g样品放入小瓶，在35 ℃平衡300 s并产生挥发性物质，挥发性物质以150 mL/min速率进入电子鼻，与传感器接触120 s[19]。

1.3.4 电子舌测定

参考董文江等[20]的方法，稍作修改。称取5 g样品，放入100 mL沸水中冲泡，双层膜密封，置于60 ℃水浴锅静置10 min后过滤，冷却到室温，进行电子舌数据采集，采集时间120 s，每个样品间用超纯水清洗10 s，每个样品重复5 次实验。

1.4 数据处理

采用Origin软件，对电子鼻与电子舌响应值进行主成分分析（principal components analysis，PCA）图与雷达图。

发芽黑麦茶经GC-MS分析，产生总离子流图对其进行质谱检索，在与样品色谱条件相同的情况下，与正构烷烃C_7～C_{40}的色谱进行对照分析，RI按下式计算：

$$RI=100\times n+100\times\frac{t_x-t_n}{t_{n+1}-t_x}$$

式中：t_x为物质保留时间/min；t_n为正构烷烃保留时间/min；n为正构烷烃的碳原子数，$t_n<t_x<t_{n+1}$，实际值与引用值误差应不超过3%。

2 结果与分析

2.1 基于电子鼻与电子舌传感器的发芽黑麦茶气味与滋味响应值分析

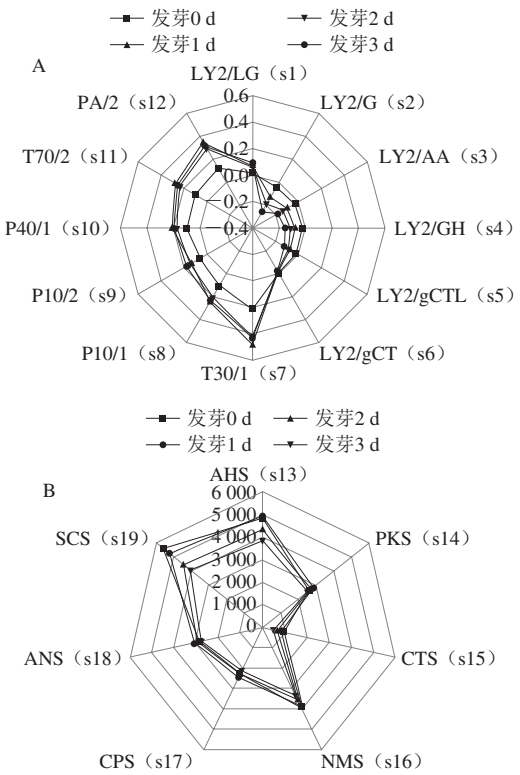

图1 发芽黑麦茶电子鼻（A）和电子舌（B）雷达图

Fig. 1 Electronic nose (A) and electronic tongue (B) radar maps of sprouted rye tea

如图1所示，除了电子鼻传感器s1与s6响应值较为接近，其余传感器都有区别。电子鼻传感器s1与s6相差不大，说明氯、氮氧化合物差距不大，丙烷丁烷区别也不大。发芽与未发芽黑麦茶的风味区别主要在传感器s7～s12，发芽相较于未发芽含有更多极性化合物、脂肪酸、芳香族化合物。s2～s5有着较小的差别，酮类胺类小幅改变，相较于s7～s12并不明显。

电子舌的味觉传感器阵列显示除了传感器s13与s19区别较大外，其他味觉基本相近。s13代表酸味，随着黑麦的发芽，酸味不断下降，这与孙丽华[21]研究的大麦发芽时苹果酸与柠檬酸在3 d之中有明显下降结果一致。s19代表苦味，苦味是由于茶中咖啡碱、茶多酚存在，可溶性糖是茶汤中甜味部分，能缓解咖啡碱与茶多酚的苦味[22]。随着黑麦的发芽，苦味下降明显。传感器s16数值较高，代表鲜度，鲜度由氨基酸产生，4 种黑麦茶鲜味差距不大，这与蒋芮等[10]结果一致。鲜味氨基酸变化不大，其中谷氨酸钠是鲜味氨基酸的代表，具有较高鲜度，天冬氨酸也具有一定鲜度。它们是黑麦茶中鲜度滋味的呈味代表。

2.2 PCA结果

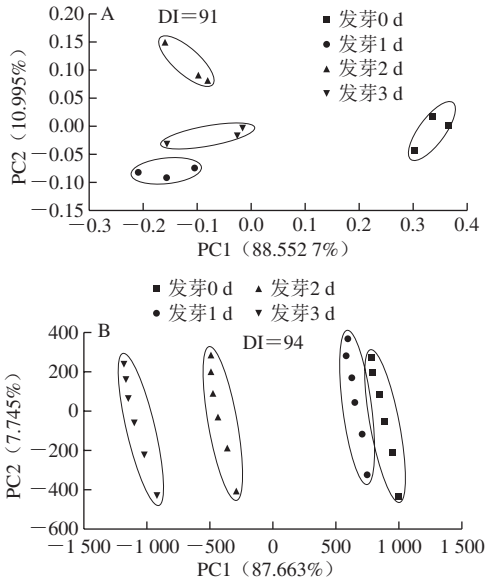

图2 发芽黑麦茶电子鼻（A）和电子舌（B）PCA

Fig. 2 Principal component analysis of electronic nose (A) and electronic tongue (B) sensor responses to sprouted rye tea

如图2A所示，PC1与PC2的贡献率分别为88.552 7%与10.995%，两者之和高达99.547 7%，说明该数据能很好地反映样品的整体信息，而判别指数（discrimination index，DI）为91表明样品之间区分度大，3 个发芽的黑麦茶较为靠近，气味接近。而未发芽的黑麦茶较远，相较于发芽的黑麦茶区别较大，发芽黑麦茶相互接近，然而未有重叠，因此能起到很好的区分作用。因为随着麦芽的生长势必会出现气味的变化，而随着麦芽的活性物质增多，风味改变较小但仍有区别。

如图2B所示，PC1与PC2的贡献率分别为87.663%与7.745%，两者之和高达95.408%，该数据也能较好地反映样品整体信息，具有代表性。DI为94，表明不同样品间具有较大的区别。随着发芽时间的延长，制成的麦茶味道区别也越来越大。发芽第1天与未发芽较为接近，发芽第2、3天的黑麦风味较为接近。与雷达图显示结果一致。第1天的麦芽较短，长度在0.2～0.5 cm之间，所产生的风味区别改变不明显，而随着发芽时间的延长，麦芽长度可达1～3 cm，风味改变较为明显。

2.3 RI定性

2.3.1 发芽黑麦茶主要香气成分

在质谱库检索定性的基础上，采用RI进行进一步的定性，确保化合物的准确性。RI仅与固定相性质和柱温有关，能很好地保证物质鉴定的准确性[23]，定性结果如表3、4所示。

发芽黑麦茶的主要香气成分来自醛类、酮类、酸类与杂环类，一方面由于美拉德反应的产生，另一方面由

于黑麦中不饱和脂肪酸的酶解与化学氧化所形成的。共检测出醛类12 种，酮类4 种，酸类5 种，杂环类7 种。

表 3 烘烤发芽黑麦茶主要香气成分相对含量变化

Table 3 Relative contents of main aroma components in sprouted rye tea

物质名称	物质风味	相对含量/%				保留时间/min	RI	
		第0天	第1天	第2天	第3天		实际值	实际值
醛类		20.14	18.78	20.50	42.23			
糠醛	类似苯甲醛的特殊气味，特殊的杏仁气味	0.39	2.28	1.86	3.84	7.238	822	818
十二醛	具有强烈脂肪香气，并有类似松叶油和橙油的强烈香气	1.22	2.38	1.22	0.88	28.845	1 408	1 409
3-糠醛	具有坚果香、霉香、烤香、壤香	—	—	—	11.34	7.341	825	835
5-甲基糠醛	有杏仁气味	4.70	5.80	6.40	12.72	12.387	959	966
反-2-辛烯醛	用于樱桃、奶制品、坚果、肉类香精的配制	1.06	0.34	0.18	1.59	15.649	1 050	1 052
壬醛	具有焦奶油硬糖的特殊香气，稀溶液具有草莓样芳香味道	4.06	4.15	4.63	9.16	17.74	1 103	1 102
反-2-壬醛	具有玫瑰、柑橘等香气，有强的油脂气味，存在于红茶、绿茶中	0.59	0.79	1.38	0.33	19.889	1 147	1 156
2,4-癸二烯醛-(*E*,*E*)	焙烘特征香韵	3.60	—	1.65	0.20	25.934	1 322	1 325
13-tetradecenal	具有醛香、柑橘香、蜡香、粉香、皂香、奶油香	0.82	0.98	0.80	0.50	27.335	1 363	ND
2,4-癸二烯醛	存在于烤烟烟叶中	3.47	0.48	1.54	0.56	24.913	1 290	1 284
十四醛	存在于香料烟烟叶中，天然存在于樟脑木油等精油里	0.22	0.91	0.30	0.80	35.115	1 611	1 613
苯乙醛	具有类似风信子的香气	—	0.66	0.54	0.30	15.145	1 037	1 043
		20.14	18.78	20.50	42.23			
杂环类		31.96	13.44	11.11	6.16			
4,6-二甲基嘧啶		4.42	—	0.57	0.70	10.821	910	ND
2-乙基-5-甲基吡嗪	具有坚果香、霉香、烤香、壤香	10.59	4.60	3.24	1.26	13.505	994	998
2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	具有坚果香、霉香、烤香、壤香	9.55	6.84	5.98	2.95	16.481	1 072	1 078
2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	具有咖啡和仁果类香气	0.39	0.48	0.21	0.25	19.498	1 139	1 145
1-(2-呋喃基甲基)-1*H*-吡咯		3.34	0.94	0.40	0.55	20.53	1 160	1 162
2-戊基吡啶	具有小牛肉似香气	3.29	—	0.33	—	21.25	1 174	1 203
2,5-二甲基-3-(2-甲基丙基)-吡嗪	具有一种绿色、土质的、芹菜气味	0.39	0.58	0.39	0.44	21.356	1 177	1 185
酮类		1.22	3.50	3.44	3.29			
1,13-十四碳二烯-3-酮		—	—	0.22	0.25	16.362	1 069	ND
2-环亚戊基环戊酮	具有薄荷香气	0.21	—	1.57	1.35	19.704	1 316	ND
(7Z)-6,10-dimethylundeca-5,9-dien-2-one	具有穿透性的青甜香、微玫瑰香，可增加烟草清甜香	0.87	0.74	0.91	1.25	30.055	1 446	1 445
6,10,14-三甲基-2-十五烷酮		0.14	2.76	0.74	0.44	41.325	1 840	1 838
酸类		5.81	4.40	2.45	6.04			
棕榈酸		0.76	1.18	0.48	0.80	44.258	1 955	1 960
丁酸	是典型的挥发性低级脂肪酸之一，难闻	—	—	0.66	1.53	5.857	762	784
十一烯酸		1.03	1.67	1.01	0.83	20.371	1 157	ND
壬酸	用于烘烤食品、肉制品、冰冻乳制品，特殊气味	4.02	1.09	0.11	2.77	24.087	1 259	1 264
Z-8-甲基-9-十四酸		—	0.47	0.19	0.10	37.981	1 713	ND

注：—.未检出。ND.未查到此值。

醛类主要来自美拉德反应，也有部分来自过氧化物的裂解与长链不饱和醛氧化降解的短链醛[24]。美拉德反应中醛类物质的产生主要源自天冬氨酸、赖氨酸、甲硫氨酸、组氨酸与葡萄糖或果糖的反应[25]。随着发芽时间的延长，醛类在总挥发性物质中占比基本稳定，在第3天有较大的增幅，前3 d为20%左右，在第3天直接达到40%左右的高占比，是前3 个样品的2 倍。这是因为发芽第3天的黑麦中的游离氨基酸有了大幅度的提高，脂肪含量有增高趋势，致使烘烤过程中美拉德反应产生醛类物质的含量有了很大提高。其中糠醛、3-糠醛、5-甲基糠醛相对含量增加最为明显，约为第2天的2 倍，它们具有烘烤香与坚果香，是发芽黑麦茶香气组成成分中重要的一部分。壬醛占比也相对较大，前3 d都保持在4.15%左右，而在第3天高达9.16%，壬醛主要由酸氢过氧化物裂解产生[26]，其独特的奶油香味是烘烤食品风味的重要组成部分。

酮类化合物是由醇氧化或酯的分解产生，虽然本身占比并不大，但其赋予了食品焦糊味[27]。随着发芽时间的延长酮类化合物也不断增加。未发芽时相对含量只有1.22%，随后3 d相对含量稳定在3%左右。在发芽的最后2 d，醇类相对含量增加，其由酯的分解产生。

在香气组成成分中除了醛类发挥着重要作用外，杂环类如吡嗪、吡啶也发挥着至关重要的作用，杂环类化合物主要来自氨基酸和糖的美拉德反应、氨基酸直接热解和葫芦巴碱降解[28]。随着发芽时间的延长杂环类化合物相对含量呈不断下降的趋势，未发芽时占比在31.96%，而发芽第3天时仅占6.16%。其中2-乙基-5-甲基吡嗪与2-乙基-3,6-二甲基吡嗪下降最为显著，未发芽与发芽第3天比较，分别下降了9.33%和6.60%。这是因为随着发芽时间的延长醛类物质的含量占比逐渐增多，导致杂环类物质相对含量减小，合成与热解相对减少，且杂环的阈值较高，而与杂环相比，醛类阈值小很多。

酸类化合物在发芽过程中呈先下降后上升的趋势，丁酸只出现在发芽最后一天，由发芽出现的低级脂肪酸或丁醛氧化产生。酸在挥发性气体中占比不大，但在烘烤制品中仍然具有独特的贡献，多数为脂肪酸存在于烘烤制品中，呈现烘烤香味。随着贮藏时间延长，由于微生物及氧化作用，脂肪酸会呈现酸败气味。

2.3.2 发芽黑麦茶其他香气成分分析

其他类物质中，烯烃2 种、酯类8 种、酚类2 种、醇类2 种，虽然没有醛类与杂环类占比大，但在香气上也有着独特的贡献。

随着发芽时间不断延长，酯类在发芽第2天达到了顶峰，增加了7.31%。可能是黑麦体内的酸与醇在高温作用下，不断结合生成了酯。在发芽后2 d，酯类主要部分为邻苯二甲酸二甲酯，发芽第3天其相对含量达到3.84%，比未发芽时高出2.72%。而在发芽第1天占比最多的为正癸酸正癸酯，达到5.20%，由黑麦中的癸酸与癸醇在高温下反应生成。isomaltol在发芽第2天时检出，由2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4*H*-pyran-4-one分解而成，这是其最主要生成方式[29]。糠醇是由糠醛还原而

来，在最后2 d相对含量分别为3.24%、4.52%，第0天与第1天均未检测出，在发芽第2天开始出现，这可能是由于前2 d糠醛相对含量较少，仅为0.39%和2.28%，并不足够分解为糠醇。酚类物质随着发芽时间的延长呈增加趋势，2-甲氧基-4-乙烯基苯酚与2,6-二叔丁基对甲酚都为烟草中常见酚类。2,6-二叔丁基对甲酚在麦芽长出后稳定在3%左右，2-甲氧基-4-乙烯基苯酚一直稳定在3%左右，涨幅不大。烯烃类中，*D*-柠檬烯占主要成分，该成分可以抗癌、抑制烟草中的毒性[30]。因为*D*-柠檬烯极易氧化，所以在发芽后期有所减少。而苯乙烯仅在第1天被检出，相对含量为1.65%，出芽后苯乙烯被分解不再被检出。

表 4 烘烤发芽黑麦茶其他挥发性气体相对含量变化

Table 4 Relative contents of other volatile gases in germinated rye tea

物质名称	物质风味	相对含量/%				保留时间/min	RI	
		第0天	第1天	第2天	第3天		实际值	引用值
烯烃		11.29	4.90	1.09	3.48			
苯乙烯	苯乙烯具有引人发笑的臭味	1.65	—	—	—	9.933	886	895
D-柠檬烯	类似柠檬的香味	9.64	4.90	1.09	3.48	14.623	1 024	1 028
酯类		2.95	6.07	10.26	9.20			
邻苯二甲酸酯		0.71	0.36	0.46	0.31	44.062	1 947	
乙酸糠酯	具有坚果香、霉香、烤香、壤香	—	—	—	0.47	13.378	990	991
十八酸乙烯酯		—	—	2.65	1.32	17.595	1 100	
10-十一碳炔酸十二酯		—	—	0.24	0.46	27.387	1 364	
邻苯二甲酸二甲酯	稍有芳香味	1.12	0.51	2.15	3.84	30.057	1 446	1 454
氯乙酸十六酯		—	—	1.19	0.46	30.145	1 448	
正癸酸正癸酯		1.12	5.20	3.57	1.56	35.564	1 627	
异戊酸香叶酯	呈玫瑰香气，有苹果和菠萝似底香，有苹果似甜味	—	—	—	0.30	26.751	1 346	
酚类		4.28	4.83	6.52	7.03			
2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	呈强烈香辛料、丁香和发酵似香气，有炒花生气息	3.22	1.62	3.02	3.84	25.385	1 307	
2,6-二叔丁基对甲酚	无臭，无味	1.06	3.21	3.50	3.18	31.88	1 503	1 513
醇类		—	—	5.49	4.65			
糠醇		—	—	3.24	4.52	8.376	849	853
isomaltol		—	—	2.25	0.13	13.03	979	981

2.3.3 发芽黑麦茶风味物质电子鼻与GC-MS结合分析

相较于未发芽的黑麦茶，发芽后的黑麦茶风味物质种类显著增加，导致电子鼻PCA作图时未发芽黑麦茶与发芽黑麦茶分布较远。其中，3-糠醛、1,13-十四碳二烯-3-酮、丁酸、*Z*-8-甲基-9-十四酸、乙酸糠酯、十八酸乙烯酯、10-十一碳炔酸十二酯、氯乙酸十六酯、异戊酸香叶酯、糠醇、isomaltol，都是发芽后特有的风味物质，与电子鼻传感器s9明显上升结果一致。在相对含量上，杂环类与烯烃类物质呈现下降趋势，醛类、酮类、酸类、酯类、酚类物质均呈现上升趋势。GC-MS检测结果与电子鼻的雷达图和PCA结果相吻合。

3 结 论

利用GC-MS与电子感官技术对发芽黑麦茶风味物质进行检测分析，共检测出挥发性物质42 种。随着发芽时间的延长，发芽黑麦茶醛类物质相对含量明显增加，第3天相对含量高达42.23%，其中糠醛、3-糠醛、5-甲基糠醛都有着明显上升趋势，使发芽第3天的黑麦茶具有浓重的杏仁香味。酚类物质增加，第3天相对含量达到最大为7.03%，除去杂环类与烯烃类香气挥发性成分的相对含量均有增加，在成分种类上也有变化，发芽第3天的种类明显多于第0天。与未发芽的黑麦茶相比，发芽第3天的黑麦茶在香气挥发性物质的种类与含量都有显著提高。口感上咖啡碱、茶多酚、苹果酸等含量的下降致使苦味、酸味都有明显下降，呈味氨基酸的稳定使鲜味值较高。黑麦茶具有较高的营养价值，与之相比，发芽黑麦茶具有更高营养价值，而且香味和口感的改善都是发芽黑麦茶的优势。因此发芽黑麦茶的产品在市场上具有广阔应用前景。

参考文献：

[1] 张慧, 温纪平, 郭林桦, 等. 黑麦营养特性及其在食品中的研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(3): 97-99. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2014.03.027.

[2] ROSSANA V C C, ÂNGELA F, SANDRINA A H, et al. Physicochemical characterization and microbiology of wheat and rye flours[J]. Food Chemistry, 2019, 280: 123-129. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.063.

[3] DANIEL I H, CORINA I C, LAURA C, et al. Differentiation of rye and wheat flour as well as mixtures by using the kinetics of Karl Fischer water titration[J]. Food Chemistry, 2016, 195: 49-55. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.08.124.

[4] MARIANNE S E, JULIE M J, LEN M. A new life for whole grains[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2005, 105(12): 1856-1860. DOI:10.1016/j.jada.2005.10.022.

[5] LIUKKONEN K H, KATINA K, WILHELM S A, et al. Process-induced changes on bioactive compounds in whole grain rye[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2003, 62(1): 117-122. DOI:10.1079/PNS2002218.

[6] 张慧. 黑麦的营养特性及黑麦面包的制作研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.

[7] 翟立公, 栗兰杰, 郭元新, 等. 富硒黑麦酥性饼干研究[J]. 粮食与饲料工业, 2018(11): 29-33.

[8] 王月慧. 小杂粮加工技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2010: 103-104.

[9] 张端莉, 桂余, 方国珊. 大麦在发芽过程中营养物质的变化及其营养评价[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 65-69. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201401045.

[10] 蒋芮, 李雅婷, 欧阳鹏凌, 等. 发芽对黑大麦游离氨基酸及其他营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 38-42. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.06.007.

[11] 施梦南, 龚淑英. 茶叶香气研究进展[J]. 茶叶, 2012, 38(1): 19-23. DOI:10.3969/j.issn.0577-8921.2012.01.004.

[12] 王力, 林智, 吕海鹏, 等. 茶叶香气影响因子的研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 293-298.

[13] 邹光宇, 王万章, 王淼森, 等. 电子鼻/舌融合技术的信阳毛尖茶品质检测[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 279-284. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180504-039.

[14] MAHUYA B B, RUNU B R, BIPAN T, et al. Black tea classification employing feature fusion of E-nose and E-tongue responses[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 55-63. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.09.022.

[15] RUNU B, ANGIRAS M, SOURAV M, et al. Fusion of electronic nose and tongue response using fuzzy based approach for black tea classification[J]. Procedia Technology, 2013, 10: 615-622. DOI:10.1016/j.protcy.2013.12.402.

[16] ZHOU X X, CHONG Y Q, DING Y T, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, E-nose and sensory evaluation[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 205-213. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.03.026.

[17] QIU S S, WANG J. Application of sensory evaluation, HS-SPME GC-MS, E-Nose, and E-Tongue for quality detection in citrus fruits[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(10): 296-324. DOI:10.1111/1750-3841.13012.

[18] 陈兵, 张端莉, 覃小丽, 等. 贮藏条件对发芽大麦茶风味物质变化的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(14): 76-80. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201514015.

[19] FEI P, WEN J Y, NING M, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 343-350. DOI:10.1016 / j.lwt.2016.05.004.

[20] 董文江, 杨静园, 胡荣锁, 等. 基于HS-SPME/GC-MS和电子感官技术的热泵干燥对烘焙咖啡豆风味品质影响研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 298-307; 286. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.046.

[21] 孙丽华. 大麦发芽过程中主要内源激素和内源酸[D]. 大连: 大连工业大学, 2008.

[22] 张端莉, 桂余, 刘雄. 发芽大麦茶制备工艺及茶汤营养特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 252-257; 270. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.17.047.

[23] 徐杨斌, 朱瑞芝, 尹本涛, 等. 保留指数结合准确质量测定对姜油挥发性成分的定性分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 98-103. DOI:10.16614/j.gznuj.zrb.2019.02.016.

[24] SHAHIDI F, RUBIN L J, D'SOUZA L A. Meat flavor volatiles: a review of the composition, techniques of analysis, and sensory evaluation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1986, 24(2): 141-243. DOI:10.1080/10408398609527435.

[25] 魏长庆, 刘文玉, 陈卓, 等. 亚麻籽油中Maillard源挥发性香气形成机理的初步研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(2): 31-36. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.02.008.

[26] 王永倩. 油条风味分析评价及其形成机理初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

[27] 胡宏成, 曾韬, 陈华成. 蒎烯合成异松油烯的研究[J]. 生物质化学工程, 2007(1): 19-21. DOI:10.3969/j.issn.1673-5854.2007.01.005.

[28] DAVIDE B, ERICA L, CHIARA C, et al. Coffee aroma: chemometric comparison of the chemical information provided by three different samplings combined with GC-MS to describe the sensory properties in cup[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 218-226. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.07.088.

[29] HAFIZA Y, ROBERT S T L, DAVID J C. Flavour generation during commercial barley and malt roasting operations: a time course study[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 378-387. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.046.

[30] 谷风林. 酪蛋白美拉德产物的制备、性质及在烟草中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.