基于电感耦合等离子体发射光谱和高通量测序探究不同产地黑茶品质

梁丽云[1]，郭佳欣[1]，李静[1]，黎俊生[1]，杨瑞岭[2]，赵仁亮[1*]

（1.河南农业大学园艺学院，河南郑州 450002）（2.河南农业大学农学院，河南郑州 450002）

摘要：为探究不同产地黑茶的特点，本文利用扩增子测序、电感耦合等离子体发射光谱和感官审评等技术测定了六种黑茶中的细菌多样性、矿质元素、品质特征和主要滋味物质含量。研究结果：锌、咖啡碱在安茶、熟普洱茶等嫩度高的黑茶中积累较多，锰、硒等元素在茯砖、青砖茶、藏茶等嫩度低的黑茶中积累较多。熟普洱茶叶底细嫩、易碎；六堡茶茶褐素高，为 10.32%，叶底细嫩、完整；茯砖茶可溶性糖高，为 54.44 mg.g^{-1}，叶底完整、较硬；藏茶水浸出物低，为 25.36%，叶底木质化梗较多；青砖茶黄酮低，为 9.54 mg.g^{-1}，叶底梗多、含碎叶；安茶含水量低，为 7.73%，叶底嫩黄。杆菌门、放线菌门等为 6 种黑茶优势菌群。门水平丰度数据的主成分分析显示安茶与另外五种黑茶之间存在较显著的细菌群落区别。相关性分析提示杆菌、放线菌通过代谢多酚与糖类促进茶褐素形成，含水量显著影响功能菌群生长，进而调控黑茶风味与陈化品质。此次研究为不同产地黑茶品质认识提供一定的参考依据。

关键词：不同产地；高通量测序；矿质元素；滋味物质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0883

Quality Evaluation of Dark Teas from Different Origin Using High-Throughput Sequencing and ICP-OES

LIANG Liyun[1], GUO Jiaxin[1], LI Jing[1], LI Junsheng[1], YANG Ruiling[2], ZHAO Renliang[1*]

(1. College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

(2. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To explore the characteristics of dark teas from different origins, their bacterial diversity, mineral elements, quality properties and the contents of major taste substances were determined by high-throughput sequencing technology, inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and sensory evaluation, etc. The results were as follows: Zinc and caffeine tended to accumulate abundantly in high-tenderness dark teas like An tea and Pu'er ripe tea, etc, while manganese, selenium, and other elements accumulated more in low-tenderness dark teas like Fu zhuang tea, Qingzhuang tea, and Tibetan dark tea. The infused leaves of Pu'er ripe tea were tender and brittle. Liubao tea had highest theabrownins content at 10.32% and infused leaves were intact and tender. Fuzhuang tea was richest in soluble sugars,whose content was 54.44 mg.g^{-1} and the infused leaves remained intact with relatively firm texture.Tibetan dark tea exhibited the lowest water extract content at 25.36% and its infused leaves contained a large amount of lignified tea stalks. Qingzhuan tea had the lowest flavonoid content at 9.54 mg.g^{-1} and its infused leaves contained numerous stalks mixed with broken leaf fragments. An tea has the lowest moisture content at 7.73% and tender yellow infused leaves. Bacillota and Actinobacteriota, etc.were the dominant bacterial phyla across all six kinds of dark teas. Principal component analysis of microbial abundance data showed that the bacterial community of An tea was significantly different from those of the other five dark teas. Correlation analysis indicated that Bacillus and Actinobacteria promote the formation of theabrownins via the metabolism of polyphenols and carbohydrates. Moisture content significantly regulated the growth of functional microflora, thereby modulating the flavor and aging quality of dark tea.The study would offer valuable references for the comprehension of quality traits of dark teas from various origins.

Keywords: different origins; high-throughput sequencing; mineral elements; taste substances

收稿日期：2026-06-10；修回日期：2026-08-30；接受日期：2026-08-31

基金项目：河南省科技研发计划联合基金重点项目（235200810019）；横向课题豫新茶研制与开发项目（30801981）

作者简介：梁丽云（1983-），女，博士，讲师，研究方向：茶叶生物化学及综合应用，E-mail：molixiang23@126.com

通讯作者：赵仁亮（1983-），男，博士，副教授，研究方向：茶叶加工及品质化学，E-mail：zrenliang@henau.edu.cn

黑茶产生可追朔到唐宋时期的茶马交易事件中，其起源地为四川雅安市，传说当时由于交易茶的集市距离茶产区较远，托运主要靠马，打包的茶捆绑在马背上，运输需用几个月、甚者更长时间，由于茶在马背上多次被雨水淋湿、又晒干，到了交易地，打包的绿茶经自然发酵变成了一种全新的茶类——黑茶[1]。黑茶由于产地不同，品质各具特色，目前有云南普洱茶、广西六堡茶、湖北青砖茶、雅安藏茶、陕西茯砖茶、安徽安茶等黑茶品类[2]。这些黑茶由于产地、采摘鲜叶标准、加工方式不同，形成各自品质特点。云南熟普洱茶采用云南晒青毛茶为原料，经后期的渥堆发酵、干燥后压制成不同形状，经时间历练越陈越香，浸泡后滋味醇厚、汤色红艳、叶底柔软等特点[3]。广西六堡茶鲜叶经过杀青、初揉、堆闷，当堆温达到 50 ℃时，及时翻堆散热，加上后期独特的窖藏过程，而形成“红、浓、醇、陈”四绝而著称的黑茶，此茶最大的特点多具有槟榔香、果香等品质[4]。雅安藏茶以一芽五叶的成熟鲜叶为原料，经过杀青，三蒸三揉，高温高湿渥堆发酵，最终使茶形成褐叶红汤、陈醇回甘的品质特征[5]。茯砖茶又因在伏天生产，也叫“伏茶”，香气和功效类似“土茯苓”，因而得名。在制作过程中会自然长出一种名为冠突散囊菌的益生菌，茶砖面色泽黑褐，砖内“金花”茂盛，干嗅有菌香，湿评香气纯正，滋味醇厚，汤色红黄明亮为佳[6]。安徽安茶采摘比较细嫩祁门槠叶种及其优质无性系茶鲜叶进行摊放后，杀青、揉捻和干燥，然后经“露茶”、“蒸制”等加工环节后，压紧装入在箬叶与小竹篓内，再放入烘橱内烘干，茶叶便凝结成椭圆形块状，其条索紧细匀齐，有箬叶香，具有越放越香的品质特征[7]。

虽上述均是黑茶，但品质差异较大，除产地、茶树品种、采摘标准等条件影响之外，黑茶品质形成实质是微生物参与下的酶促氧化与湿热综合作用的结果[8,9]。查文献知，不同产地黑茶品质的差异研究较少，另外由于黑茶加工步骤和后期陈放时间较久，因此大家比较关注黑茶的安全性和化学品质。本研究选取目前国内有代表性 6 种黑茶，研究他们品质差异，其中包括细菌微生物多样性检测、主要矿质元素含量检测和化学品质差异分析，此为大家对不同产地黑茶品质认识提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 茶样

本研究 6 种黑茶样，2025 年 11 月从市场购买，其茶名、产地、加工年份和原料登记见下表 1。

表 1 不同产地黑茶样基本信息

Table 1 Basic information of dark tea samples from different origins

编号	茶样名称	产地	原料	加工年份
PR	普洱熟茶	云南普洱	金芽显、面平整	2008
LB	六堡茶	广西梧州	一级茶、含芽头	2015
ZC	藏茶	四川雅安	成熟叶和老茶枝	2014
FZ	茯砖茶	陕西泾阳	带芽四五片成熟叶	2020
QZ	青砖茶	湖北赤壁	茶枝和成熟叶	2016
AC	安茶	安徽祁门	贡尖级别、芽头含量高	2023

1.2 药品和仪器

硝酸（优级纯），CNW 公司；锰（Mn）、锌（Zn）、铬（Cd）、硒（Se）、铝（Al）、铅（Pb）、铜（Cu）等标准溶液，购自坛墨质检科技股份有限公司；超纯水（电阻率为 18.2MΩ·cm），实验室自制；福林酚试剂（高纯级），购自合肥博美生物科技有限责任公司；没食子酸（含量＞99%），购自天津市光复精细化工研究所；三氯化铝（分析纯），购自郑州派尼化学试剂厂；甲醇（分析纯），购自天津市富宇精细化工有限公司；茚三酮（分析纯），购自上海麦克林生化科技有限公司。E.Z.N.A.® DNA 试剂盒，购自 Omega Bio-tek 公司；Qubit4.0 DNA 检测试剂盒，购自 ThermoFishe 公司；2×Hieff® Robust PCR Master Mix、Hieff NGS™ DNA Selection Beads，购自 Yeasen 公司等。

EXPEC6100 型电感耦合等离子体发射光谱仪（Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer，ICP-OES），杭州谱育科技发展有限公司；EXPEC790S 超级微波消解仪，杭州谱育科技发展有限公司；GWA-UP 型超纯水系统，北京普析通用仪器公司；GL-88B 漩涡混合器，海门市其林贝尔仪器制造有限公司；DYY-6C 电泳

仪电源，北京市六一仪器厂；FR-1000 凝胶成像系统，上海复日科技有限公司；Q33226Qubit® 4.0 荧光计，ThermoFisher Scientific 公司；ETC 811PCR 仪，北京东胜创新生物科技有限公司；ML204T 型电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；Centrifuge 5810R 高速低温离心机，德国艾本德股份公司；SSW-600-2S 电热恒温温水槽，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；Merck Millipore 明澈™-D24UV 纯水系统，德国密理博公司；Multiskan GO 全波长酶标仪，美国 Thermo Fisher Scientific 公司；UV Professional V1.30.0 紫外—可见分光光度计，翱艺仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黑茶样品的消解及其矿质元素测定

将茶样用粉碎机磨碎，过 40 目筛。称样 0.2 g，置于微波消解密闭罐中，加入适量硝酸，塞紧内塞，置于微波消解仪中，按消解程序进行样品消解，待消解完毕，取下冷却，多次用水冲洗罐壁，转移至 50 mL 容量瓶，定容。采用 ICP-OES 对样品消解液中各矿质元素含量进行测定，每一样品均进行 3 次重复测定，其方法参照 Fawad 等[10]。

1.3.2 黑茶主要化学成分检测

水分测定参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》；水浸出物测定参照 GB/T 8305-2013《茶叶 水浸出物含量测定》；福林酚法测定茶多酚含量参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚测定》；黄酮含量测定参照的三氯化铝法。游离氨基酸总量测定参考 GB/T 8314-2013《茶叶中 游离氨基酸含量测定》；咖啡碱含量参照 GB/T 8312-2013《咖啡碱含量测定》中液相色谱法的测定；茶叶种可溶性糖的测定使用浓硫酸-蒽酮方法，茶褐素测定采用系统比色法测定[11]。

1.3.3 黑茶中细菌微生物 16S rRNA 高通量测序

使用 E.Z.N.A.® DNA 试剂盒，按照其说明书进行茶样中微生物总群落基因组 DNA 的提取。然后，用 Qubit 4.0 检测试剂盒测量 DNA 的浓度，以确保提取到了足够量的高质量基因组 DNA，再使用生工生物工程（上海）股份有限公司 Illumina Miseq 平台对样品的 16S rRNA 基因测序方法，对细菌的 16S V3V4 区（测序策略：Novaseq-PE250）测定，采用 2×Hieff® Robust PCR Master Mix（Yeasen，货号 10105ES03，中国）扩增 16S rRNA V3-V4 区域片段，使用两条经 PAGE 纯化的细菌 16S rRNA 通用扩增引物，上游引物：CCTACGGGNGGCWGCAG；下游引物：GACTACHVGGGTATCTAATCC，再将扩增产物用 1%（*m/V*）琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物纯化效果，测定纯化后 PCR 产物的浓度，将纯化产物等摩尔数混合，以备上机前纯化和测序分析。

1.3.4 黑茶感官审评

由专业审评团队对各个茶样进行感官审评，审评参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》黑茶审评方法。

1.4 数据分析

每个茶样中 9 种矿质元素和主要滋味物质平行重复测定 3 次，用软件 SPSS Statistics 22 对数据进行单因素方差分析，当 $P<0.05$ 进行邓肯式复极差检验。文中柱状图用 GraphPad Prism 9.5 制作。对每个茶样细菌 16s rRNA 高通量测定数据运用 QIIME（Quantitative Insights Into Microbial Ecology，v1.8.0）软件进行序列过滤，以保证分析结果准确性。用 QIIME 软件，对获得的序列按 97%的序列相似度进行归并和 OTU（Operational Taxonomic Unit）划分，获得每个 OTU 所对应的分类学信息，计算多样性指数。

2 结果与分析

2.1 不同黑茶中微量元素检测与分析

茶叶中的矿质元素对人体健康有着重要的调节作用，同时矿质元素也是茶叶品质评价的重要指标之一[12]。本文对 6 种黑茶中的 9 种微量元素利用 ICP-OES 进行检测，并对结果进行方差分析与比较，如下图 1。

一般越老的茶中，Mn 含量越高，由图 1-Mn 知，Mn 含量排序：安茶、熟普洱茶<六堡茶<青砖茶<茯砖<藏茶，且（$P<0.05$），安茶中 Mn 含量为 854.67 $mg\cdot kg^{-1}$。黑茶 Se 含量为 0.05~0.25 $mg\cdot kg^{-1}$，一般越老的叶子，Se 积累越高，由图 1-Se 知，Se 含量排序：安茶、熟普洱茶、六堡茶、茯砖<青砖茶<藏茶，且（$P<0.05$），安茶 Se 含量为

0.08 mg·kg^{-1}。由图 1-Cr 知，Cr 低迁移元素，一般老叶中含量高，Cr 含量排序：安茶、熟普洱茶、六堡茶、茯砖、青砖茶<藏茶，且（P<0.05），安茶 Cr 含量为 0.23 mg·kg^{-1}。由图 1-Cd 知，一般老叶中积累较多，Cd 含量排序：安茶、熟普洱茶<茯砖、六堡茶、青砖茶<藏茶，安茶 Cd 含量为 0.03 mg·kg^{-1}。陈世金等[13]报道黄山毛峰和祁门红茶中的 Mn 含量 410.1~900.0 mg·kg^{-1}，Cr 含量为 0.31~0.44 mg·kg^{-1}，Cd 含量为 0.02~0.03 mg·kg^{-1}。茶树是富集 Al 的植物，一般越老茶中 Al 积累越高，由图 1-Al 知，Al 含量排序：安茶<熟普洱茶<六堡茶<青砖茶<茯砖<藏茶，且（P<0.05）。黑茶 Zn 含量一般处在 30~45 mg·kg^{-1}，一般越嫩的茶中 Zn 含量越高[14]，由图 1-Zn 知，Zn 含量排序：安茶、熟普洱茶>六堡茶、藏茶>茯砖>青砖。由图 1-Pb 知，Pb 含量排序：安茶、熟普洱茶、六堡茶、茯砖<青砖茶<藏茶，安茶 Pb 含量为 0.94 mg·kg^{-1}。由图 1-Cu 知，6 个黑茶 Cu 含量均小于 10 mg·kg^{-1}，Cu 含量排序：熟普洱、安茶、六堡茶、茯砖、青砖茶<藏茶，且（P<0.05），安茶中铜含量为 5.23 mg·kg^{-1}。Zhang 等[15]研究报道 PCA 分析证实 Cu 元素是区分不同品类藏茶的 5 种标志性差异元素之一。由图 1-As 知，As 含量排序：安茶、茯砖<六堡茶、青砖茶<熟普洱<藏茶，且（P<0.05）。安茶中 As 含量为 0.05 mg·kg^{-1}。黑茶中 Cr、Pb、Cd、As 的含量执行国家食品安全标准（GB 2762），这 6 个茶均未超标。李金贵等[16]研究指出茶叶中 Ca、Mn、Al、Pb、Cr、As 含量的高低与茶叶叶片的成熟度呈正相关，Zn 元素含量与茶叶叶片的成熟度呈负相关。黑茶中的 Al、Cu、Mn、Cr 元素含量整体处于较高水平，这可能与其原料特性和加工工艺、茶树所在环境密切相关[17]。经上述元素含量分析，6 种黑茶原料嫩度的顺序可能为安茶、熟普洱茶>六堡茶>茯砖、青砖茶、藏茶。

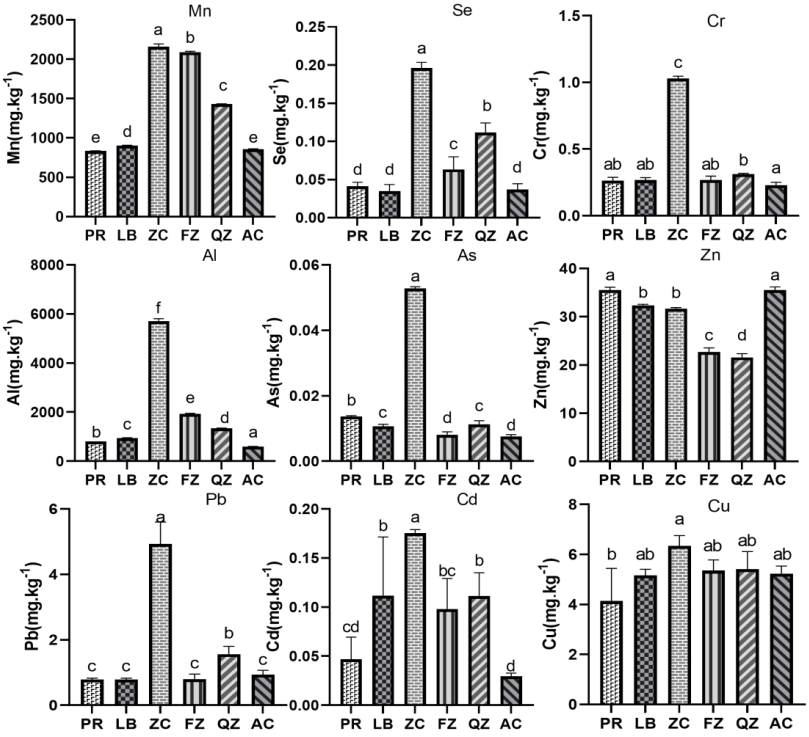


图 1 六个黑茶样中 9 种微量元素含量高低分析

Fig.1 Analysis of the content of 9 trace elements in six dark teas

注：不同的字母代表不同的处理差异显著（P<0.05）。下同。

2.2 不同黑茶中主要化学成分检测与分析

水分是微生物赖以生存的条件，是黑茶后期发酵与陈化内含物持续转化基础，茶中含水量不足会使茶叶发酵缓慢、风味欠佳[18]。（GB/T 32719.1-2016 黑茶 第 1 部分：基本要求）标准规定黑茶出厂时含水量大于 10%，由图 2A 知，安茶含水量最低，为（7.73±0.03）%，其余 5 种茶含水量均达到 10%以上，含水量排序：六堡茶>普洱、茯砖、青砖>藏茶、安茶，且（P<0.05）。茶褐素是黑茶中重要的水溶性色素，决定茶汤“暗”的物质基础，也是茶多酚是否充分转化的一个指标[19]。由图 2B 知，茶褐素排序：六堡茶>熟普洱>茯砖、藏茶>青砖>安茶，且（P<0.05），其中六堡茶茶褐素含量为 10.32%，王雪蕾[20]比较 5 种黑茶茶褐素大小，得出同样陈化年份里六堡茶茶褐素含量最

高，为 9.39%~15.30%。水浸出物是溶解在茶汤中可溶性物质总和，由图 2C 知，水浸出物排序：安茶>六堡茶>普洱、茯砖>青砖、藏茶，且（P<0.05）。可溶性糖可增加茶汤甜醇度，由图 2D 知，茯砖可溶性糖含量最高，是 54.44 mg·g^{-1}，其次青砖茶 53.44 mg·g^{-1}、藏茶 48.82 mg·g^{-1}，这 3 种茶共同特点，茶原料较成熟，Liu[21]报道四种藏茶可溶性糖 32.53~55.36 mg.g^{-1}，经陈化和微生物作用使其可溶性糖增多[22]。茶树中的咖啡碱主要分布在细嫩新梢叶组织中，并随叶子生育度增强而含量逐渐降低，梗中含量小于叶子中，且咖啡碱在茶叶加工中相对较稳定[23]。由图 2E 知，咖啡碱排序：安茶、普洱>六堡茶>茯砖>青砖、藏茶，且（P<0.05）。普洱茶与安茶咖啡碱含量高，说明原料嫩度好，另一方面与茶树品种有关[24]，Chen 等[25]报道 6 种黑茶中普洱茶咖啡碱含量最高。伯年国等[26]报道普洱熟茶咖啡碱含量为 52.92 mg·g^{-1}。由图 2F 知，安茶氨基酸含量最高（P<0.05），此茶发酵程度低，芽叶嫩度好。其余 5 种茶游离氨基酸为 1.28%~1.44%，普洱茶和六堡茶虽嫩度较好，但经深度发酵和长时间陈化，氨基酸消耗较多。蒋桂文[27]报道贮藏 6 年的六堡茶氨基酸含量为 1.31%~1.42%。沈杉杉[28]报道安茶在贮藏 11 年到 25 年过程中，其 19 种游离氨基酸均呈下降趋势。

茶多酚是茶中含量最高一种次生代谢产物，是决定茶叶色香味一重要质量指标，它含量高低影响茶汤滋味的苦涩感和浓强度，但在黑茶制作和贮藏过程转化成茶黄素、茶红素和茶褐素等，进而降低茶汤苦涩感，增加茶汤醇厚度。刘屹阳等[29]报道普洱茶经过渥堆发酵茶多酚从 18.60%降至 7.81%。图 2G 知，茶多酚排序：安茶>普洱>六堡茶、茯砖>青砖、藏茶，且（P<0.05），普洱茶多酚含量为 7.50%。由图 2H 知，黑茶叶绿素保留量与茶叶发酵时温度和酸度等有关，发酵温度越高和酸度越强，叶绿素保留量越少。熟普洱茶渥堆发酵温度在 55 ℃至 60 ℃之间，且微环境有机酸组成和种类变化剧烈[30]，因此熟普洱茶的叶绿素破坏更多，其含量最低（P<0.05），为 0.35 mg·g^{-1}。茯砖茶叶绿素最高，含量 0.78 mg·g^{-1}，此茶采摘叶较成熟，审评时叶底较绿，另一方面此茶发酵时温度较低，茯砖茶发花期温度保持 26~28 ℃[31]，致叶绿素破坏度低。黄酮苷类具有柔和涩味和苦味，且阈值极低，黄酮醇苷类脱去糖苷配基变成黄酮或黄酮醇，可降低黄酮醇苷类物质的苦味，改善茶汤滋味。由图 2F 知，安茶和茯砖茶中黄酮含量最高，这两个茶与其余茶相比，陈化时间较短。Fang 等[32]研究报道以新鲜茶叶为原料，经过杀青、揉捻和预处理后，设置三种不同的挤压程度（轻度、中度、高度挤压），进行厌氧发酵，结果高挤压富集了肠杆菌属（*Enterobacter*），枝孢属（*Cladosporium*），塞托福马属（*Setophoma*）等微生物，主要促进黄酮苷等结合态酚类的降解。此青砖茶黄酮含量最低，审评知，此茶压的最紧实。

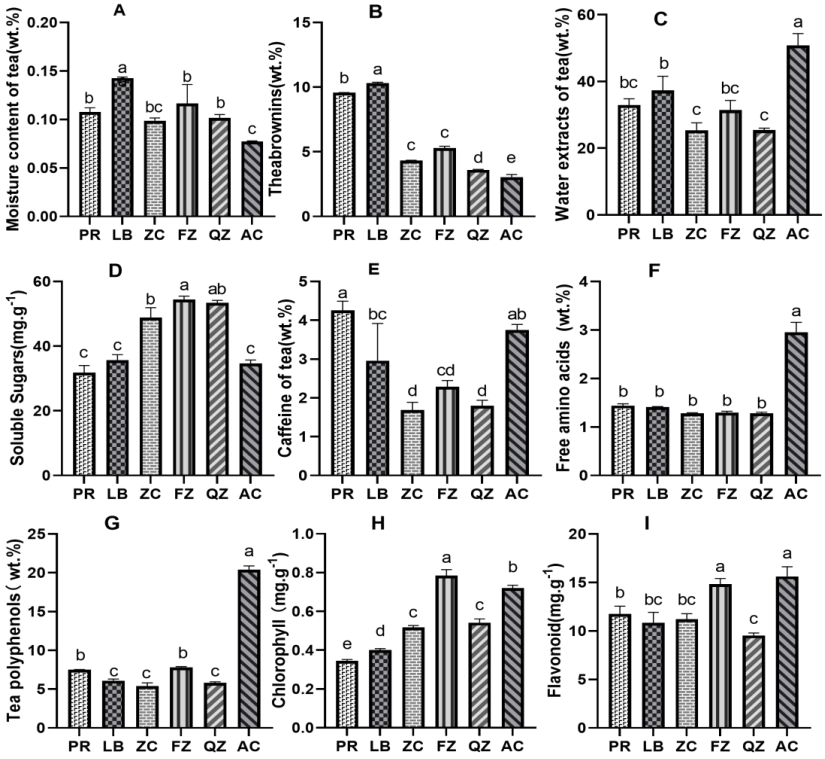


图 2 六种黑茶中主要化学成分含量的分析

Fig.2 Analysis of the contents of major chemical components in six dark teas

2.3 不同产地黑茶细菌群落多样性分析

2.3.1 不同产地黑茶细菌群落 α 多样性

表 2 不同产地黑茶细菌 α 多样性分析结果

Table 2 Analysis results of alpha diversity of bacteria in dark tea from different origins

NO	OTUs	Shannon	Chao	Ace	Simpson	Coverage/%
PR	314±20.42^{ab}	3.29±0.04^{a}	412.74±35.63^{a}	400.35±31.24^{a}	0.083±0.003^{b}	99.83±0.02^{b}
FZ	178.67±53.42^{b}	2.97±0.84^{a}	181.17±53.53^{b}	181.42±52.52^{b}	0.184±0.124^{b}	99.98±0.01^{a}
Zc	477.33±66.54^{a}	3.89±0.66^{a}	495.51±62.80^{a}	493.95±65.19^{a}	0.11±0.064^{b}	99.93±0.03^{ab}
Ac	127.33±36.36^{b}	0.70±0.09^{b}	128.46±36.98^{b}	128.64±36.91^{b}	0.78±0.019^{a}	99.99±0.00^{a}
LB	481.67±58.95^{a}	3.64±0.27^{a}	506.24±52.55^{a}	503.51±52.59^{a}	0.083±0.023^{b}	99.92±0.04^{ab}
QZ	407.33±18.76^{a}	3.37±0.08^{a}	419.81±19.05^{a}	419.68±18.75^{a}	0.129±0.015^{b}	99.94±0.00^{a}

注:不同的字母代表不同的处理差异显著（P<0.05）。

α 多样性指数通常用来反映微生物群落的多样性和丰度，包括 Shannon 指数，Simpson 指数、Chao 指数、Ace 指数和 Coverage 覆盖率指数。Simpson 指数数值越小，Shannon 指数越大，表示微生物群落的多样性越高，Ace 指数和 Chaol 指数反映微生物群落的丰度，其数值越大表示微生物群落丰度越高，Coverage 指数指各样品文库的覆盖率，其数值越高，表明样品中序列被测出的概率越高，该指数实际反映了本次测序结果是否代表样本的真实情况。不同产区黑茶样品中微生物群落的 α 多样性分析结果见表 2。由表 2 知，黑茶样品中微生物群落的覆盖率均>99%，说明样品中新物种没有被测出的概率很低。黑茶样品细菌菌群的 α 多样性指数差异显著（P<0.05）。其中藏茶、六堡、青砖中 OUT 的数量最多，也说明这三个茶中可鉴定的细菌种类最多，它们与茯砖茶、安茶中的细菌种类数量差异显著（P<0.05）。六堡茶、藏茶细菌菌群的 Shannon 指数在 6 种茶中较高，Simpson 指数较小，反应细菌群落丰度 Chao、Ace 指数较大；但样品安茶细菌多样性指数与其他黑茶样品显著差异（P<0.05），其 OTUs 数值最小，Shannon 指数最小，Simpson 指数最大，说明此茶细菌种类多样性最小，Ace 指数和 Chao1 指数最小并于其他茶中的细菌数差异显著（P<0.05）。

2.3.2 不同产地黑茶细菌群落 β 多样性及丰度

表 3 不同产地黑茶中微生物在“门”水平细菌丰度的统计（%）

Table 3 Statistics of microbial abundance at the "phylum" level in dark tea of different regions (%)

细菌门名称 phylum	PR	LB	ZC	FZ	QZ	Ac
杆菌门 Bacillota	45.068	47.998	22.843	11.299	71.732	2.017
放线菌门 Actinomycetota	29.010	30.079	7.441	9.123	2.364	0.896
假单胞菌门 Pseudomonadota	16.307	13.988	28.511	31.975	10.157	4.777
拟杆菌门 Bacteroidota	3.953	3.4422	9.622	5.654	1.856	0.325
疣微菌门 Verrucomicrobiota	0.014	0.156	0.085	0.042	0.009	0.004
绿非硫细菌门 Chloroflexota	0.006	0.041	0.288	0.640	0.155	0.037
蓝细菌门 Cyanobacteriota	0.011	0.067	0.239	0.202	0.056	0.007
栖热菌门 Deinococcota	0.016	0.027	1.112	3.141	0.158	0.034
热脱硫杆菌门 Thermodesulfobacteriota	0.003	0.0326	0.166	0.028	0.001	0
未分类细菌 unclassified_Bacteria	5.464	3.224	28.787	37.680	13.413	91.870

6 种样品共产生 1105 种 OTUs，经注释后可归为 23 门、49 纲、129 目、244 科、549 属、747 种。6 种样品在门分类水平上细菌群落组成具有差异性，由表 3 知杆菌门（Bacillota）在青砖茶丰度达到 71.7%，放线菌门（Actinomycetota）在六堡茶中达到 30.1%，假单胞菌门（Pseudomonadota）在藏茶中达到 32%，拟杆菌门（Bacteroidota）在藏茶中 9.2%，因此说杆菌门、假单胞菌门、放线菌门和拟杆菌门为此 6 种黑茶中的优势菌门，其余菌门相对丰度小于 1%。据报道杆菌门 Bacillota 是黑茶发酵核心优势菌门，发酵中后期的稳定成熟菌群落，主导蛋白质水解、氨基酸转化、风味物质生成[33]。假单胞菌门在黑茶发酵前期和中期的优势菌，参与多酚氧化、

多糖降解，后期丰度下降[34]。放线菌门参与纤维素、木质素降解，贡献陈香、菌香物质。拟杆菌门参与碳水化合物代谢，提升茶汤甜醇度[35]。表 3 为丰度在前 10 的门水平细菌名和丰度值。

主成分分析（Principal Component Analysis，PCA），是对数据进行简化分析技术，其运用方差分析，将复杂的微生物群落数据差异反映在二维坐标图上。基于门水平分别对不同产地黑茶中细菌微生物群落进行主成分分析，结果见 PCA 图 3。由图 3 知，云南普洱（H1）与广西梧州六堡（H5）距离较近，其次是湖北青砖（H6）、四川雅安的藏茶（H3）、陕西泾阳茯砖（H2）较近，安徽的安茶（H4）在一角落，说明安茶细菌群落多样性与其他茶类有很大差异。由聚类图 4 知，广西梧州六堡茶与云南熟普洱茶先聚成一类，而后与湖北的青砖茶聚成一类，陕西泾阳的茯砖茶与四川雅安藏茶先聚到一起，而后再与六堡茶、普洱茶、湖北青砖茶聚到一起，最后与安徽安茶聚到一起。细菌群落的相似性，一与地理位置有关，不同地理位置温湿度不同，影响微生物生长；另外与茶叶发酵程度，不同发酵程度的茶中微生物种类差距很大，可以看出安徽安茶是 6 种茶中茶多酚保留量最多的茶，此茶没有经渥堆发酵，品质接近绿茶，因此微生物细菌群落与其余 5 种黑茶差距较大。Liao 等[36]研究不同产地发酵辣椒微生物群落演替规律，筛选出 12 种地域微生物标记物种，包括木糖葡萄球菌、乳酪乳球菌、格氏乳球菌等。其中 3 种类菌在四川样品中富集，爱达荷片球菌在湖南样品中占优，混淆魏斯氏菌仅在贵州样品中出现，成为区分产地的核心微生物标记。Guo 等[37]研究指出毛茶的化学组成可重塑局部微生物群落，进而驱动黑茶形成独特品质。

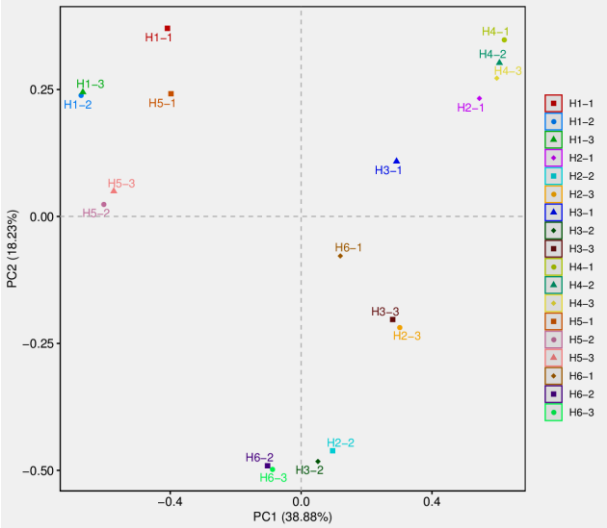


图 3 基于门水平的黑茶细菌群落主成分分析

Fig.3 Principal Component Analysis of Bacterial Communities at Phylum level in Dark Tea

注：H1 是 PR，H2 是 FZ，H3 是 ZC，H4 是 AC，H5 是 LB，H6 是 QZ。每个样重复三次，下同。

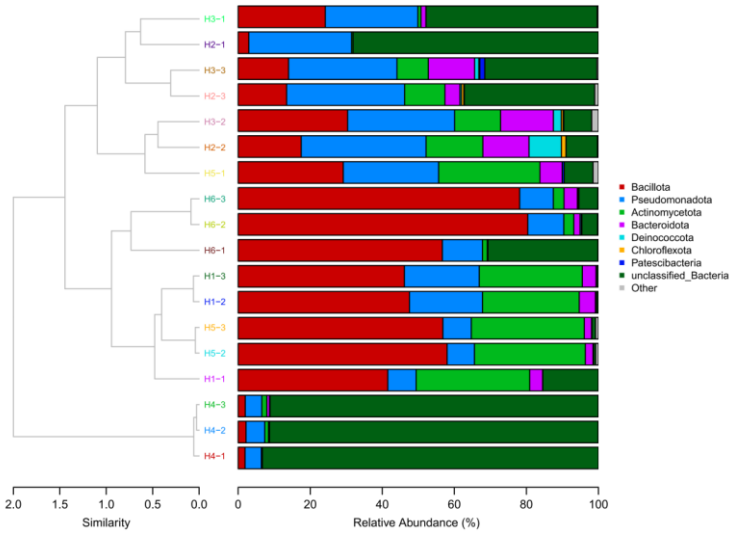


图 4 六种黑茶细菌门水平相对丰度堆叠柱状图及其聚类分析结果

Fig.4 Stacked bar charts and clustering analysis results of relative abundance of six dark tea bacterial phyla at the horizontal level

2.4 细菌群落与黑茶中主要生化成分之间的相关性分析

图 5 展示群落放线菌门（Actinomycetota）、假单胞菌门（Pseudomonadota）、拟杆菌门（Bacteroidota）、杆菌门（Bacillota）、栖热菌门（Deinococcota）、未分类类群（Unclassified）与茶品质指标咖啡碱、茶多酚、可溶性糖、茶褐素和水分含量之间的关系。图中颜色越偏橙黄，Spearman 相关系数越接近 1，代表正相关越强；颜色越偏灰，越接近-1，代表负相关越强。放线菌门丰度与茶褐素相关系数为 r=1，同时与茶叶含水量相关系数 r=0.89，说明放线菌门与茶褐素和水分含量高度正相关，在黑茶发酵中茶褐素生成与放线菌门密切相关，且在高水分环境中更活跃。栖热菌门与咖啡碱相关系数 r=-0.77、与可溶性糖相关系数 r=0.89，说明栖热菌门与咖啡碱呈强负相关，与可溶性糖呈强正相关，推断栖热菌门可能参与咖啡因的降解和糖类的转化，但栖热菌门相对丰度小于 1%。杆菌门与茶多酚呈中等负相关（r=-0.66），与茶褐素（r=0.37）、水分（r=0.43）呈弱正相关，说明它可能参与茶多酚的转化，促进茶褐素的生成。假单胞菌门与可溶性糖呈中等正相关（r=0.54），可能参与糖类的代谢过程。拟杆菌门与茶多酚、咖啡因均呈负相关（r=-0.43），与茶褐素呈弱正相关（r=0.43），可能辅助参与茶多酚和咖啡碱降解。总之，放线菌门和杆菌门，可能参与茶多酚、咖啡碱、糖类的代谢，直接推动茶褐素等关键品质成分的形成，是黑茶风味和陈化的核心驱动者[38]。水分含量作为重要的环境因子，对放线菌门等关键菌群的生长有显著影响，是黑茶渥堆工艺中需要重点控制的参数。Xiao 等[39]利用枯草芽孢杆菌 LK-1 对黑茶进行固态发酵，结果茶中茶多酚总量在减少，酯类儿茶素显著减少，这些变化可能有助于减轻茶叶的苦涩味。

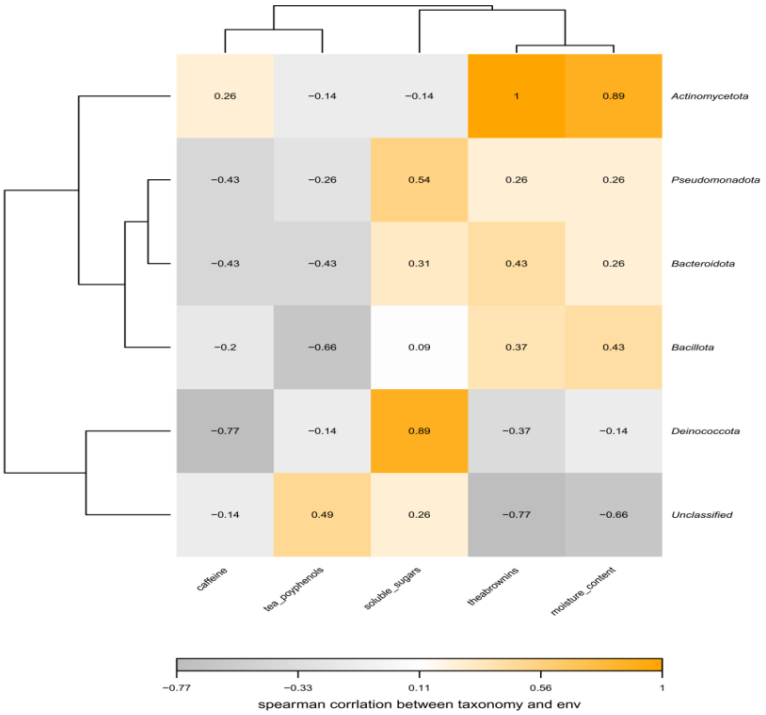


图 5 丰度为前 6 的细菌群落与黑茶主要生化物质的 Spearman 相关性分析

Fig.5 Spearman correlation analysis between the top six abundant bacterial communities and major biochemical of dark tea

2.5 不同产地黑茶感官品质的分析

经专业团队审评，六种黑茶在同样浸提条件下，由图 6 知普洱茶和六堡茶的茶汤颜色暗红，藏茶橙红、茯砖茶橙黄稍褐、青砖茶橙黄、安茶金黄明亮。由表 3 知，安茶贡尖级别、芽头含量高，普洱茶粗壮的芽头清晰可见，六堡茶含芽头和嫩枝，茯砖茶原料芽四五片成熟叶，青砖中 50%的茶梗，藏茶木质化棕黄色茶梗较多。除六堡茶是散茶之外，其余五种茶均是紧压茶，普洱和安茶的原料较细嫩，然发酵程度不同，微生物种群多样性不同。茯砖茶是紧压茶，但茶整体压制较松散，微生物群落丰富，茶里金花繁茂，清香、菌花香，叶底能看到完整茶新稍，叶质较硬。六堡茶原料较嫩、散茶，发酵较充分，细菌群落丰富，滋味醇和，陈香、干果浓郁。黑茶最终品质好坏，原料的纯净度和嫩度是基础，但后期的发酵和陈化是黑茶品质的形成起着关键性作用，只有发酵陈化时间适

当，茶滋味既不会淡薄，也不会过于苦涩。因此品质较佳的黑茶既要有纯正的原料，又要有适当发酵陈化过程。

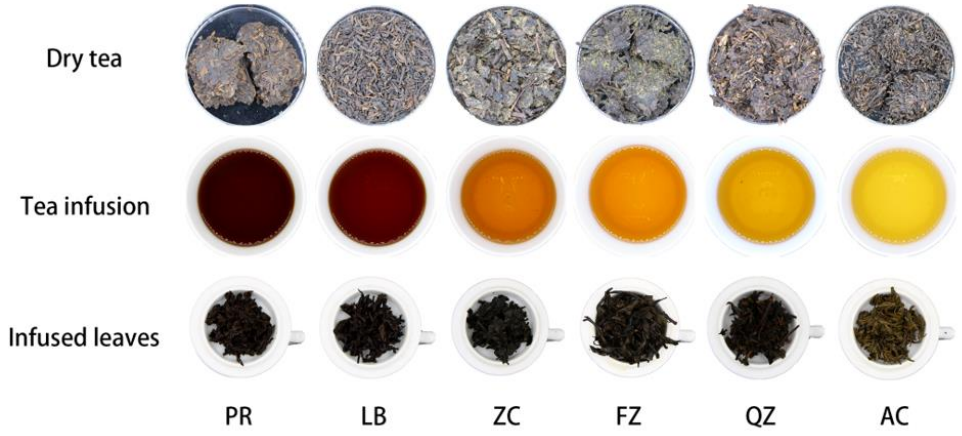


图 6 六种黑茶干茶、茶汤、叶底展示

Fig.6 Display of dry tea, tea infution and infuted leaves from six types of dark teas

表 3 茶感官审评结果

Table 3 Sensory evaluation results of dark tea

编号	干茶外形	香气	滋味	汤色	叶底
PR	紧压茶、面平整，芽头粗壮、金豪显	陈香、木香、缺乏青砖的穿通力	醇和	暗红	粗壮芽叶、无梗、易损
LB	散茶、有金色芽头和柔嫩的梗	陈香、槟榔干果香、窖藏味显	醇和	褐红	细嫩芽叶、有细梗、完整
ZC	紧压茶、木质化茶梗可见、成熟大叶子、黄褐	陈香、热嗅有异味	稍醇和	橙红	叶碎、梗多且木质化程度高
FZ	紧压茶、但茶压制整体比较松散、茶里面满是金花	清香和菌花香	甜醇爽滑	橙黄稍褐	完整的芽叶、叶质比较硬
QZ	紧压茶、茶里面茶梗较多约占比 50%	陈香、有较强穿透力	稍柔和	橙黄	梗多、叶底较碎且黄绿色
AC	紧压茶、压的不紧、茶条紧细，芽头占比高	清香、有绿茶的清香	稍苦涩	金黄明亮	叶底嫩黄、芽头清晰可见

3 结论

本文利用电感耦合等离子体发射光谱仪测定 6 种黑茶中的 Zn、Mn、Se、As、Ge、Al、Cu、Cd 和 Pb 的含量，利用紫外分光光度计等仪器检测了茶叶中主要滋味物质，并对茶样进行感官审评。研究结果表明，Mn、Se、As、Ge、Al、Pb、Cd 等元素在茶树中迁移率较低，易在老叶中积累较多，Zn 元素和咖啡碱一般在嫩叶中积累较多，综合判断 6 种黑茶原料的嫩度顺序为安茶、普洱茶>六堡茶>茯砖、青砖茶、藏茶。每种茶品质特点：安茶茶多酚、游离氨基酸、水浸出物含量均最大，而含水量最小，此茶有绿茶的清香，滋味稍苦涩，汤色金黄，叶底嫩黄。普洱茶叶绿素含量最低，可溶性多糖含量少，咖啡碱含量最高，此茶芽头粗壮、金豪显，陈香，滋味醇和，汤色暗红，叶底细嫩、易碎。六堡茶茶褐素含量最多，含水量最高，水浸出物较高，此茶有柔嫩的梗，有果香含窖藏香，滋味醇和，汤色褐红，叶底细嫩，较完整。茯砖茶可溶性糖含量最高，黄酮含量高，叶绿素含量最高，此茶里满是金花，菌花香和清香，滋味甜醇爽滑，汤色橙黄稍褐，叶底芽叶完整，叶质较硬。藏茶水浸出物低，咖啡碱低，茶多酚低，可溶性糖高，此茶叶底木质化梗较多。青砖茶黄酮含量最低，咖啡碱含量低，可溶性糖较高，此茶陈香、且具有较强穿透力，叶底梗多、含碎叶。

基于高通量测序得出 6 种黑茶中细菌的多样性特点，细菌群落 α 多样性安茶与其余 5 种黑茶差距较大，被鉴定的 OTUs 数值最小，Shannon 指数最小，Simpson 指数最大，茶细菌种类多样性最小，Ace 指数和 Chao1 指数最小并于其他茶差异显著（P<0.05），被鉴定的细菌菌群丰度最小。黑茶细菌群落 β 多样性，杆菌门、放线菌门、变形菌门和拟杆菌门是优势菌群落，相关性分析六堡茶、普洱茶、青砖、藏茶、茯砖和安茶细菌群落的多样性的相似度以次降低，相关性分析揭示黑茶品质差异与菌群多样性密切相关，放线菌门、杆菌门和假单胞菌门通过参与茶多酚、蛋白质、氨基酸、糖类等物质的代谢，直接推动茶褐素等关键品质成分的形成，是黑茶风味和陈化的核心驱动者。水分含量作为重要的环境因子，对杆菌门等关键菌群的生长有显著影响，是黑茶后发酵和陈化工艺中重点控制的参数。本文不足之处，每一产地只选了一个茶样，希望这种不完美的设计，为人们认识不同产地黑茶特点提供一定的线索。像在人们研究物理现象时往往在理想状态下，探寻现实中的客观规律。

参考文献

[1] 卢勇,任思博.黑茶起源、演变与发展考[J].湖南师范大学社会科学学报,2025,54(2):49-59.

[2] 孔亚帅.黑茶的非挥发物代谢组学研究[D].合肥:安徽农业大学,2021.

[3] LI L Y, ZHAO Y Q, LI Y L, et al. Effects of storage time on the quality and microbial community of ripe Pu-erh tea [J]. Food Chemistry: X, 2026, 33(1): 103389.

[4] DU J J , LAI C, XIA Y T, et al. Effect of *Cladosporium tenuissimum* on the metabolic profile and the quality of Liupao tea during aging process [J]. Fermented Foods, 2026, 2(6): 100007.

[5] WANG Z Q, LI H Y, HUANG W M, et al. Landscapes of the main components, metabolic and microbial signatures, and their correlations during pile-fermentation of Tibetan tea [J]. Food Chemistry, 2024, 430(1): 136932.

[6] MA W J, YAO H E, ZHAO L, et al. Effects of the flowering process on the metabolite profiles and bioactivities of Shaanxi Fu brick tea [J]. Food Chemistry: X, 2026, 35(4): 103741.

[7] 赵红艳,李媛媛,常润润,等.安茶加工工艺与品质研究[J].食品工业,2026,47(4):123-127.

[8] LI Y C, HAO J, ZHOU J T, et al. Pile-fermentation of dark tea: Conditions optimization and quality formation mechanism [J].LWT-Food Science and technology, 2022, 166(15): 113763.

[9] 韦佳汝,聂凯丽,陈小强,等.黑茶渥堆发酵中微生物多样性及功能活性研究进展[J].食品工业科技,2025,46(9):424-434.

[10] FAWAD Z, WAJID A K, MUHAMMAD I, et al. Assessing the health risks of heavy metals and seasonal minerals fluctuations in Camellia sinensis cultivars during their growth seasons [J].Food and Chemical Toxicology, 2024, 187(5): 114586.

[11] 李远华.茶学综合实验[M].北京:中国轻工业出版社,2018.

[12] PIOTR D, PIOTR R, KATARZYNA W. Minerals in tea and herbal infusions and assessing the human health risk arising from their presence [J]. Journal of Food Composition and Analysis. 2025, 144(8): 107652.

[13] 陈世金,蔡群兴,赵辉,等.常见茶叶中 14 种元素含量分析及重金属风险评价[J].化学通报,2021,84(6):591-595.

[14] 刘璇,李玉川,宋育林,等.秭归丝绵茶鲜叶非挥发性成分及丝形态结构分析[J].食品科学,2024,45(2):268-273.

[15] ZHANG J, XIE T C, WU Y Y, et al. Occurrence profiles of 43 minerals in different types of Tibetan tea determined by ICP-MS and the associated risk assessment [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2026, 153(5): 109060.

[16] 李金贵,卢钰荣,龚永新.不同叶龄的茶树鲜叶种元素动态变化分析[J].湖北农业科学.2018,57(23):98-99.

[17] AN Y L, QIAO D H, JING T T, et al. Extensive ICP-MS and HPLC-QQQ detections reveal the content characteristics of main metallic elements and polyphenols in the representative commercial tea on the market [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11(12): 1450348.

[18] 王冰洁,黄奕,赵芸,等.黑茶品质化学成分及工艺影响因素研究进展[J].食品工业,2023,44(1):206-211.

[19] CHEN X J，WANG Y Y，CHEN Y, Jun Dai , et al. Formation, physicochemical properties, and biological activities of theabrownins [J]. Food Chemistry, 2024, 448(8): 139140.

[20] 王雪蕾.不同产地黑茶品质对比分析与综合评价[D].昆明:云南农业大学,2023.

[21] LIU Y T, HUANG W M, ZHANG C Y, et al. Targeted and untargeted metabolomic analyses and biological activity of Tibetan tea [J]. Food Chemistry. 2022, 384(8): 132517**.**

[22] LI N, ZHAO M M, CHAO J, et al. Non-targeted and targeted detection of hydrophilic compounds in fu brick tea: A study on samples from major Chinese production regions and different processing stages [J]. Food Chemistry, 2025, 471(4): 142634.

[23] 宛晓春.茶叶生物化学(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2016.

[24] XIA E H, LI F D, TONG W, et al. Revealing Distinctions in Genetic Diversity and Adaptive Evolution Between Two Varieties of Camellia sinensis by Whole-Genome Resequencing [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 603819.

[25] CHEN H, LI Y, LIANG Y, et al. Advances in the chemical composition and fermentation control of dark tea [J]. Beverage Plant Research, 2026, 6: e021.

[26] 伯年国,刘琨毅,李若愚,等.富含植物乳杆菌的普洱熟茶品质分析[J].食品研究与开发,2024,45 (5):22-28.

[27] 蒋桂文.不同贮存环境对六堡茶感官品质和化学成分的影响[J].现代农业科技,2015,14:282-283+290.

[28] 沈杉杉.基于代谢组学分析的安茶贮藏过程中品质变化规律研究[D].合肥:安徽农业大学,2022.

[29] 刘屹阳,杨懿,任海涛,等.普洱熟茶翻堆过程中的品质化学及其动态变化分析[J/OL].食品与发酵工业,1-10[2026-06-29].

[30] WANG T, AN J S, BO N G, et al. Changes and metabolic mechanisms of organic acids in the fermentation of pu-erh tea [J]. LWT-Food Science Technology, 2024, 203(7): 116304.

[31] 王昕,范晨伟,刘金虎.茯砖茶加工工艺及其发酵过程中优势菌群研究进展[J].商洛学院学报,2024,38(4):62-69+87.

[32] FANG X, PU Q, QU A L, et al. Mechanisms of phenolic conversion in anaerobic fermentation of tea leaves revealed by integrating microbiome and metabolome analysis [J]. Food Research Intemational. 2026, 228: 118381.

[33] 莫宏婷,陈智雄,胥伟.藏茶渥堆过程中嗜热菌的分离及对藏茶品质形成影响[J].华中农业大学学报,2025,44(6):106-116.

[34] HUANG X X, LI Y L, ZHOU F, et al. Insight into the chemical compositions of Anhua dark teas derived from identical tea materials: A multi-omics, electronic sensory, and microbial sequencing analysis [J]. Food Chemistry, 2024, 441(5): 138367.

[35] HU M K, ZHANG H M, HAN L S, et al. Integrated Microbiome-Metabolome Analysis and FunctionalStrain Validation Reveal Key Biochemical TransformationsDuring Pu-erh Tea Pile Fermentation [J].microorganisms, 2025, 13(8): 1857.

[36] LIAO H, LUO Y, LIAN X, et al. Microbial community dynamics and flavor formation mechanisms during fermentation of fermented chilies from different regions based on macro-genome sequencing, SPME-GC-MS, electronic nose, and electronic tongue [J]. Food Science and Human Wellness. 2025, 14(10): 9250408.

[37] GUO Y T, PAN Y N, FENG X Y, et al.Reshaped local microbiology metabolism by raw tea according to pile fermentation in the dark tea [J]. Journal of Advanced Research. 2025, 11(78): 211-224.

[38] ZHU M Z, LI N, ZHOU F, et al. Microbial bioconversion of the chemical components in dark tea [J]. Food Chemistry, 2020, 312(15): 126043.

[39] XIAO L K, YANG C H, ZHANG X L, et al. Effects of solid-state fermentation with Bacillus subtilis LK-1 on the volatileprofile, catechins composition and antioxidant activity of dark teas [J]. Food Chemistry:X, 2023, 19: 100811.