X射线辐照对酱香型轮次白酒陈化的影响：基于感官评价与化学组分的多轮次分析

李浩哲[2]　沈小娟[1]　禄凌飞[1]　宋怡[1]　毛豪[3]　戴秋涟[1]
郑　蕾[1]　张云博[2]　涂荣坤[1]　黄　江[2]

[1]（泸州老窖股份有限公司　泸州　646000）

[2]（强电磁工程与新技术国家重点实验室 华中科技大学　武汉　430074）

[3]（四川国醴酱酒酒业有限公司　泸州　646000）

摘要　传统酱香型白酒陈酿周期漫长，导致仓储成本高昂。探索高效、安全快速的人工催陈技术是白酒工业的潜在需求。本研究旨在系统评估72 Gy/sX射线辐照对不同轮次酱香型白酒基酒的加速催陈效果及微观作用机制。以酱香型白酒的1、3、5、7轮次基酒为研究对象，设置5个不同梯度的X射线辐照剂量（0 kGy、1.95 kGy、4.55 kGy、6.50 kGy、9.10 kGy），辐照后3 d以内取样检测。结合感官评价、气相色谱（GC）及高效液相色谱（HPLC）分析，追踪并解析辐照前后酒体宏观品质与微观挥发性成分的演变规律。研究表明，经X射线辐照的催陈效果具有显著的剂量依赖性与轮次特异性。在各轮次的最佳辐照剂量下，辐照减弱了1轮次基酒的糙辣感与苦味，降低了7轮次基酒的涩感并增强其酯香，提升了3、5轮次基酒的醇厚度与协调性。X射线辐照是一种具有应用前景的高效物理催陈技术，通过为不同轮次基酒匹配特定的剂量工艺设定，可在短时间内模拟自然贮藏的陈化效果，为酱香型白酒的工业化加速陈化及品质分级提升提供了理论依据。

关键词　酱香型白酒，X射线辐照，白酒催陈，白酒老熟

中图分类号　TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0062

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0062

引用该文：

李浩哲, 沈小娟, 禄凌飞, 等. X射线辐照对酱香型轮次白酒陈化的影响:基于感官评价与化学组分的多轮次分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0062.

LI Haozhe, SHEN Xiaojuan, LU Lingfei, *et al*. Effect of X-ray irradiation on the aging of sauce-aroma Baijiu base liquors from different fermentation rounds: a multi-round analysis based on sensory evaluation and chemical components[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0062.

Effect of X-ray irradiation on the aging of sauce-aroma Baijiu base liquors from

基金资助：国家固态酿造工程技术研究中心（2024HX14）、华中科技大学学术前沿青年团队计划（2019QYTD06）

第一作者：李浩哲，男，工学学士，目前于华中科技大学攻读博士学位，从事电子束辐照应用相关研究。

通信作者：涂荣坤，E-mail: turk@lzlj.com；黄江，研究员，E-mail: jhuang@hust.edu.cn

收稿日期：初稿 2026-05-19；修回 2026-06-09

Supported by National Engineering Research Center of Solid-State Brewing (2024HX14), Huazhong University of Science and Technology Academic Frontier Youth Team Program (2019QYTD06)

First author: LI Haozhe, male, bachelor's degree in engineering, currently pursuing doctoral degree at Huazhong University, engaging in electron beam irradiation applications

Corresponding author: TU Rongkun, E-mail: turk@lzlj.com; HUANG Jiang, researcher, E-mail: jhuang@hust.edu.cn

Received 19 May 2026; accepted 09 June 2026

different fermentation rounds: a multi-round analysis based on sensory evaluation and chemical components

LI Haozhe[2] SHEN Xiaojuan[1] LU Lingfei[1] SONG Yi[1] MAO Hao[3] DAI Qiulian[1] ZHENG Lei[1]
ZHANG Yunbo[2] TU Rongkun[1] HUANG Jiang[2]

[1](*Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou 646000, China*)

[2](*State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

[3](*Sichuan Guoli Jiangjiu Liquor Co., Ltd., Luzhou 646000, China*)

ABSTRACT Traditional sauce-aroma Baijiu aging requires an extremely long period, leading to high storage costs. Exploring efficient and safe artificial aging technologies is an urgent need for the Baijiu industry. This study aims to systematically evaluate the accelerated aging effect and underlying microscopic mechanism of low-dose X-ray irradiation on sauce-aroma Baijiu base liquors from different fermentation rounds. Base liquors from the 1st, 3rd, 5th, and 7th rounds were selected as samples, and five X-ray irradiation dose gradients (0 kGy, 1.95 kGy, 4.55 kGy, 6.50 kGy, 9.10 kGy) were applied, and all samples were analyzed within 3 days after irradiation. Combining sensory evaluation, gas chromatography (GC), and high-performance liquid chromatography (HPLC) analysis, the evolution of both macroscopic quality and microscopic volatile components before and after irradiation were tracked and elucidated. The results showed that the aging effect of X-ray irradiation exhibited significant dose dependence and round specificity. At the respective optimal irradiation doses, irradiation reduced the pungency and bitterness of the 1st-round base liquor, decreased the astringency and enhanced the ester aroma of the 7th-round base liquor, and improved the mellowness and balance of the 3rd- and 5th-round base liquors. Low-dose X-ray irradiation is a highly promising efficient physical aging technology. By matching specific low-dose windows for base liquors from different rounds, it can effectively simulate natural aging effects within a short time, providing a solid theoretical basis for the industrial accelerated aging and quality grading improvement of sauce-aroma Baijiu.

KEYWORDS Sauce-aroma Baijiu, X-ray irradiation, Baijiu accelerated aging, Baijiu maturation

CLC TL99

中国白酒作为世界著名的蒸馏酒之一，以其独特的酿造工艺和复杂风味体系享誉全球。其中，酱香型白酒以其酱香突出、优雅细腻、酒体醇厚、回味悠长的典型风格，被誉为中国白酒中的典范[1-2]。其传统生产工艺采用高温制曲、多轮次发酵和长期陶坛陈酿的独特方式，整个生产过程共包含7个轮次，每个轮次的基酒在香气和口感上都各具鲜明特色[3-5]。然而，酱香型白酒的品质提升高度依赖自然陈化过程，此过程通常持续三年以上。在这漫长的时间里，酒体通过缓慢的氧化、还原、酯化、缩合等反应促进风味物质的转化与平衡[6-7]。这不仅显著增加了企业的仓储与时间成本，更制约了产能扩张与市场的快速响应能力。

为缩短陈酿周期，国内外学者已探索多种人工加速催陈技术，主要包括超声波处理、微波辐射、高压电场、电离辐射等[8-9]。在众多技术中，电离辐射技术因其非热、高效产生自由基驱动化学反应的特性而备受关注。目前，已有部分研究尝试将γ射线或电子束应用于酱香型白酒的催陈处理[10-11]。然而，不同辐射源对酒体的影响机制存在显著差异。电子束穿透深度有限，能量易在酒体浅层沉积；通过电子束打靶转换产生的X射线具有更强的穿透能力，有助于改善大容器酒体内部的剂量分布[12]。辐照对酒体风味的实际影响仍与吸收剂量及酒体基质有关，目前关于X射线在酱香型白酒催陈中的应用研究仍显不足。此外，酱香型白酒7个轮次基酒在化学基质和风味缺陷上存在巨大差异，因此不同轮次基酒对辐照处理的响应不可一概而论。例如，1轮次生涩味与酸味较重；3轮次、5轮次作为核心基酒，风味最为丰富协调，但其微观酯香结构也相对敏感；而7轮次尾酒则带有明显的焦糊与苦涩味。现有的辐照研究

往往忽视了这种轮次间的复杂性，未能精准区分“适宜催陈的剂量”与“破坏酒体的剂量”，这在一定程度上制约了该技术在白酒工业中的精准应用。

因此，本研究利用X射线的高穿透性，以酱香型白酒最具代表性的第1轮次、3轮次、5轮次、7轮次基酒为研究对象，探讨不同梯度X射线辐照对其感官品质和微观化学成分的影响。本研究旨在探明X射线辐照对特定轮次酒体加速催陈的剂量效应。结合现代色谱分析技术与多元统计方法，重点识别辐照诱导下的关键成分变化，阐明X射线如何选择性地促进刺激性醛类与致苦高级醇的降解，从而揭示其在不破坏基质前提下加速酱香型白酒老熟的微观机制，旨在为建立“基于轮次特异性”的X射线精准催陈工艺提供理论依据与数据支撑。

1　材料与方法

1.1　实验样品与X射线处理过程

本研究选取中国四川省泸州市古蔺县某酒厂2022−2023生产年度酿造的酱香型轮次白酒作为实验样品，包括1轮次、3轮次、5轮次、7轮次基酒。所有酒样均在自然陈酿6个月后取样，初始酒精度为53%（体积分数）。基于蒙特卡洛模拟对X射线在酒体中穿透深度与剂量分布的分析结果，选用304不锈钢卡扣式密封罐（容量2 500 mL，直径15 cm，高度17 cm，壁厚0.3 mm）作为辐照容器。该材质具有优良的化学稳定性，可确保辐照过程中酒体不受污染。样品分装过程在洁净实验环境中完成，操作人员穿着实验服并佩戴无菌手套，每罐灌装量控制在（2 000±50）mL，确保液面与罐盖保持4 cm空间以避免辐照过程中液体溢出。本研究的X射线辐照与品质评价流程见图1。

辐照实验在武汉爱邦高能技术有限公司的辐照中心完成，采用5 MeV电子辐照加速器转换靶产生X射线。加速器高压维持在4.2 MV，束流强度控制在5 mA，束下传输线速度设定为1 m/min。剂量标定遵循GB/T 15053—2008[13]标准，使用辐射显色薄膜剂量片对罐体表面、侧面、内盖及底部进行多点测量。标定结果显示单次辐照罐体表面平均吸收剂量为0.65 kGy。每个轮次酒样按表面剂量设置5个剂量梯度（0 kGy、1.95 kGy、4.55 kGy、6.50 kGy、9.10 kGy）。根据单次辐照剂量与束下传输时间估算，对应的平均剂量率约为7.2×10^{-2} kGy/s（约72 Gy/s），属于高瞬时剂量率辐照。辐照过程中样品容器表面覆盖食品级PE保鲜膜，确保无杂质引入。辐照现场及样品容器见图2。

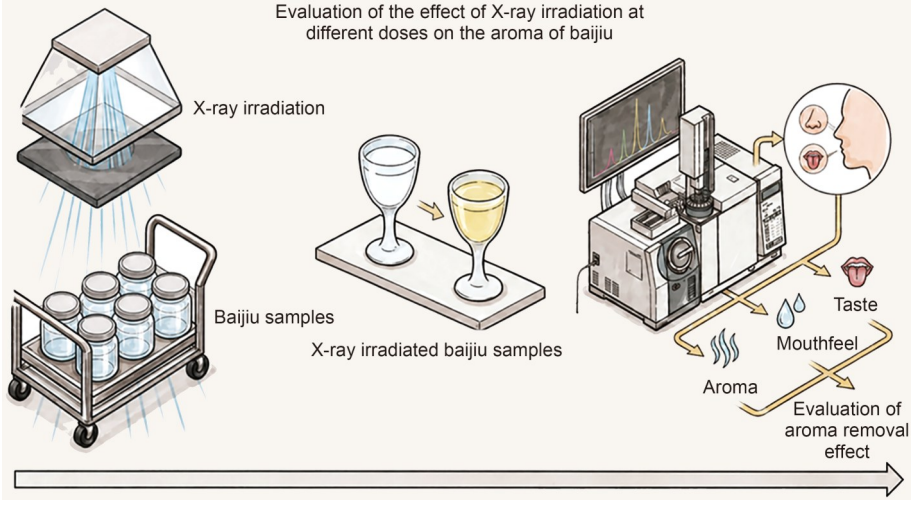


图1　酱香型白酒X射线辐照及催陈效应评估示意图

Fig.1　Schematic diagram for evaluating X-ray irradiation and accelerated aging effects on sauce-aroma Baijiu



图2 酱香型白酒X射线辐照及催陈现场图
Fig.2 Scene image of X-ray irradiation and accelerated aging for sauce-aroma Baijiu

1.2 酒样感官评价与理化分析

辐照处理完成后，所有酒样在3 d以内完成取样及后续的感官评价、气相色谱和高效液相色谱分析，避免因长时间放置引入自然陈化变量的干扰。品评方面，委托评酒师团队进行系统性感官评价。参照GB/T 10781.4—2021[14]酱香型白酒感官质量分级标准，建立包含两种维度的评价体系：香气特征维度涵盖酱香、粮香、陈香、焦香、烘焙香、辅料香、酯香、酸香、花果香9个指标；口感特征维度包括酸、甜、苦、涩、咸、鲜6种基本味觉以及持久度、糙辣度2个物理感知指标。使用6分制量化评分标准（0分：无感知；1分：微弱；2分：较弱；3分：明显；4分：较强；5分：突出）。

采用滴定法测定酒体中的总酸和总酯含量，具体操作参照GB/T 10345—2022《白酒分析方法》[15]执行。采用气相色谱-质谱联用系统（5977B，Agilent）对挥发性风味组分进行分析。使用DB-WAX极性毛细管柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）和HP-INNOWax色谱柱进行分离。程序升温条件：初始温度40 ℃保持3 min，以5 ℃/min升至130 ℃，再以3 ℃/min升至230 ℃保持10 min。进样口温度250 ℃，传输线温度280 ℃，载气为高纯氦气（1.0 mL/min）。质谱条件：电子轰击离子源（70 eV），离子源温度230 ℃，扫描范围 *m/z* 35~450。采用内标法定量，以2-乙基丁酸和叔戊醇为内标物。采用高效液相色谱系统（1260 Infinity II，Agilent）分析有机酸组成。色谱柱：Hi-Plex H+（300×7.7 mm），柱温60 ℃，流动相为5 mmol/L H_2SO_4溶液，流速0.6 mL/min，检测器：DAD检测器（210 nm）。定量分析包括乳酸、乙酸、丙酸等主要有机酸。

2 结果与分析

2.1 X射线处理过程的蒙特卡洛仿真

为确保本研究中所使用的容器内酒体能够接受均匀且充分的辐照处理，本研究利用FLUKA蒙特卡洛代码构建了辐照模型，系统对比了5 MeV电子束（Electron beam，EB）直射与5 MeV电子束打靶产生的X射线（X-rays）在酒体介质中的输运过程及能量沉积特性。仿真结果如图3所示。

仿真结果清晰地揭示了两种射线源的差异。5 MeV电子束的能量沉积表现出显著的表面聚集效应，其有效穿透深度仅局限于入射表面以下2~3 cm区域，随着深度增加剂量呈指数级急剧衰减，无法满足大容器酒体的整体处理需求。相比之下，5 MeV电子束打靶产生的X射线源展现出优异的体积处理能力。高能X射线光子具有极强的穿透力，能够有效穿透直径15 cm的酒体和不锈钢容器壁，在整个目标体积内形成相对均匀的剂量场分布，避免了剂量“死角”。此外，X射线在穿透过程中主要通过两种不同的量子效应与物质发生相互作用，在整个酒体内部空间激发了大规模的次级粒子。其一为康普顿散射（Compton scattering），即入射X射线光子与物质原子外层轨道电子发生非弹性碰撞，将部分能量转移给电子使其逃逸成为康普顿电子，光子自身则以更低能量和改变方向继续传播。由于酒体中碳、氧等轻元素的外层电子结合能较低（通常为数十至数百eV），康普顿散射在5 MeV X射线能量范围内是主导的相互作用机制，其对总能量沉积的贡献率超过80%。其二为光电效应（Photoelectric effect），即入射光子被原子内层轨道电子完全吸收，电子获得光子全部能量后从原子中发射。光电效应主要发生在较低光子能量（<100 keV）区域，且其截面与原子序

数的4~5次方成正比，因此在酒体这类主要由低原子序数元素组成的介质中贡献较小。这两种效应产生的康普顿电子和光电子作为次级粒子，在酒体介质中继续通过库仑相互作用激发和电离沿途分子，形成沿径迹分布的激发态分子（H_2O^*、$C_2H_5OH^*$）、离子自由基（$H_2O^+\bullet$、e^-_aq）等活性物种。这是引发酒体中水分子解离和乙醇分子激发，进而产生羟基自由基（•OH）、氢自由基（•H）和水合电子（e^-_aq）等高活性物种的物理前提。仿真结果表明，5 MeV X射线适用于本研究的酒样辐照条件，可为后续引发均匀且充分的催陈反应提供必要的物理条件。

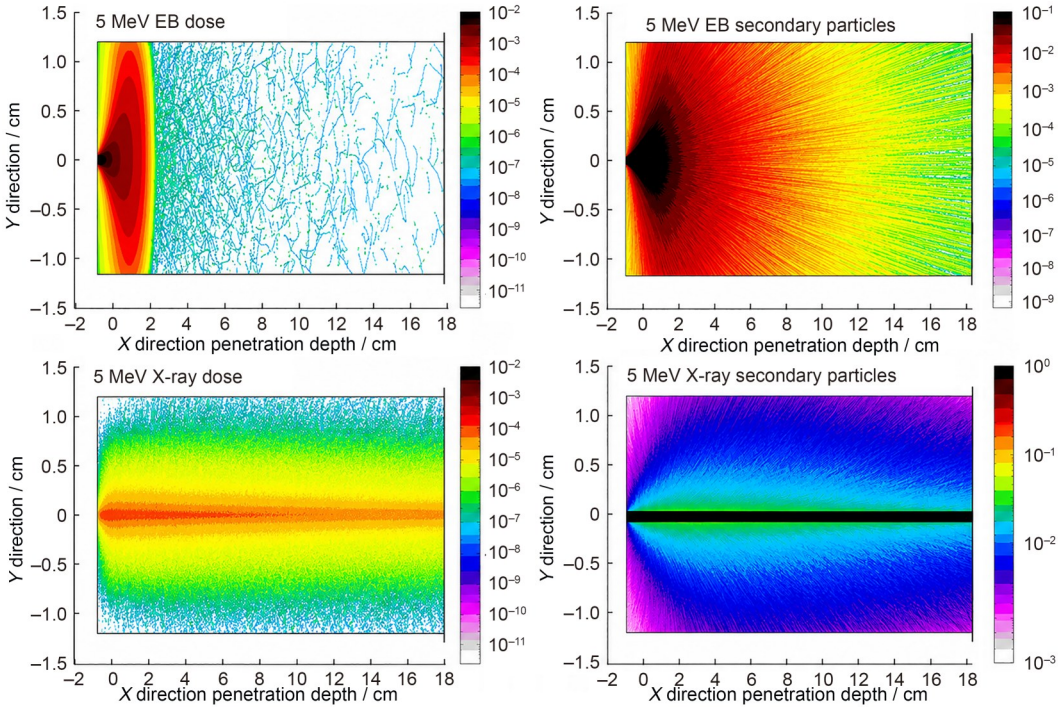


图3 不同粒子源对酒体穿透的蒙特卡洛仿真结果（彩色见网络版）

Fig.3 Monte Carlo simulation results of penetration of different particle sources into the liquor body (color online)

2.2 X射线辐照对酱香型轮次酒感官品质的影响

感官评价是衡量白酒催陈效果的重要依据。本研究基于专业评酒师团队的感官加权评分进行系统分析，为直观呈现最佳催陈效果，图4选取了各轮次中感官表现最优的辐照剂量组与其对应的未辐照对照组进行雷达图对比展示。分析结果表明，X射线辐照与不同轮次基酒特定的物质基质发生复杂的辐射化学反应，各轮次基酒在特定的“剂量窗口”下展现出明显不同的感官演变特征。

对于风味最为丰富、作为酱香型白酒骨架的3轮次和5轮次核心基酒，辐照的主要作用在于提升风味的协调程度与口感的醇厚度，但二者达到最佳状态所需的能量阈值存在显著差异。3轮次基酒在4.55 kGy的中等剂量下表现最佳。相较于对照组，该剂量显著削弱了新酒中突出的“糙辣感”和微带的“苦味”，使酒体入口更加顺滑；同时，它激发了潜在的“酯香”与“陈香”，使得原本协调性不足的香气趋于融合，呈现出一种自然老熟的协调感。然而，当剂量进一步增加，酒体骨架开始显得松散，说明过高的能量破坏了其原有的平衡。相比之下，5轮次基酒因其自身更为厚重的基质，需要更高的能量输入才能实现品质跨越，其最佳感官点出现在9.10 kGy。高剂量处理不仅有效降低了其原有的苦涩味，更显著增强了典型的“酱香”馥郁感和“烘焙香”，使酒体在保持原有力量感的同时，变得更加丰满、圆润，回味更悠长。

对于具有鲜明风味特征的1轮次（头酒）和7轮次（尾酒），辐照的催陈作用则更多体现为“去杂”与“特征重构”。1轮次基酒原酒具有较强的刺激性、生青味和较高的酸感。在6.50 kGy的剂量处理下，酒体的糙辣感有所减弱，苦味降低，酸香虽有所凸显但口感酸度未见恶化。整体而言，辐照在一定程度上缓和了1轮次基酒的冲鼻刺激感，使酒体风格从"生硬"向"相对柔和"转变。7轮次基酒则以焦糊味重、苦味突出为特征。在

9.10 kGy的高剂量辐照下，其感官品质发生了显著变化。强烈的能量输入使焦香和烘焙香进一步增强，酯香大幅提升，涩感明显降低。尽管苦味未显著削弱，但整体香气结构经历了重构，焦香与酯香的协同作用使原本粗糙的尾酒呈现出一种类似陈年老酒的复杂香气特征。

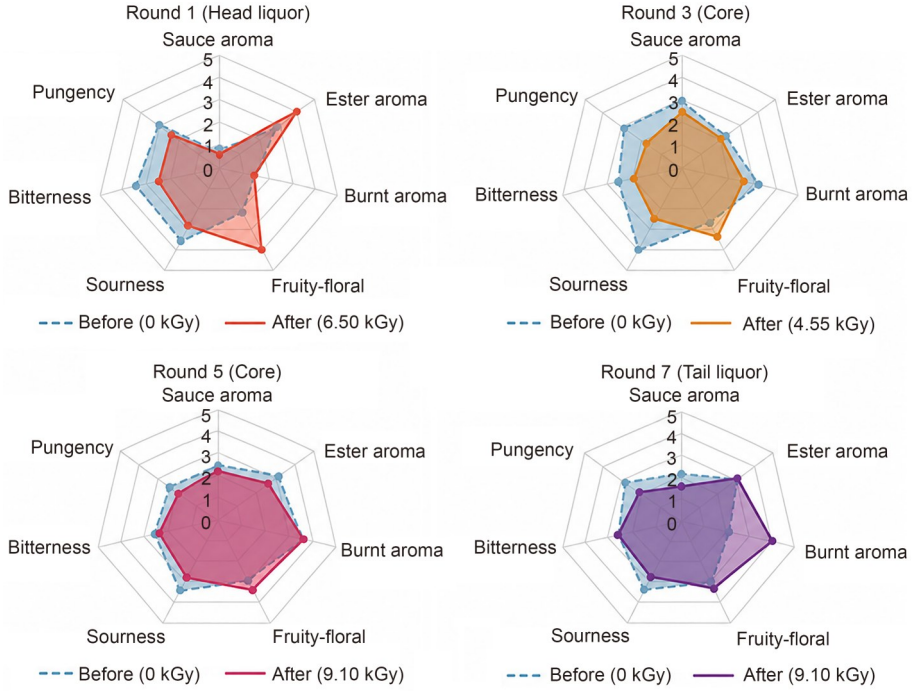


图4 X射线辐照前后不同轮次酱香基酒的关键感官特征评分对比

Fig.4 Comparison of key sensory scores of sauce-aroma Baijiu base liquors before and after X-ray irradiation

综上所述，X射线辐照催陈是一个高度基质依赖的过程。实现较佳感官效果的关键在于为每个特定轮次的基酒匹配精确的辐射剂量，以在抑制不良风味（如糙辣、苦）和强化优势风味（如酱香、焦香、花果香）之间找到最佳平衡点。

2.3 X射线辐照对酱香型轮次酒理化成分的影响

感官品质的变化源于酒体微观化学成分在辐照下的演变。本文基于气相色谱（GC）和液相色谱（HPLC）分析对此进行追踪。本文围绕各轮次最佳剂量点讨论理化成份变化。

2.3.1 X射线辐照下轮次酒总酸总酯变化分析

总酸和总酯是反映白酒陈化程度和酒体平衡的关键宏观指标。自然陈酿是一个缓慢的酸酯平衡调整过程。滴定法测定结果（表1）显示，在各轮次的最佳感官剂量点，X射线辐照在极短时间内改变了平衡。

在最佳辐照剂量下，所有轮次基酒的总酯含量相较于对照组均出现了不同程度的下降。例如，1轮次由8.93 g/L降至7.84 g/L，3轮次由6.43 g/L降至4.42 g/L，5轮次由4.87 g/L降至4.45 g/L，7轮次由4.94 g/L降至4.13 g/L。这表明X射线促进了酯类物质向酸和醇的转化，模拟了老酒中酯类物质的自然损耗，有助于消除新酒中稍显突出而不够融合的酯香。然而，总酸含量的变化则展现出显著的轮次差异性。在3轮次的最佳剂量（4.55 kGy）下，总酸含量出现了显著下降，从对照组的3.68 g/L锐减至2.24 g/L。表明在该剂量提供的氧化环境中，有机酸的氧化分解或脱羧反应占据了主导地位，其速率远超酯水解产酸的速率，这种酸度的快速降低直接贡献于感官上刺激感的减弱。相反，1轮次、5轮次和7轮次在各自的最佳剂量下，总酸含量保持了相对稳定，反映出在这些基质中，酸类物质的生成与消耗达到了动态平衡。

2.3.2 核心轮次（3、5轮次）最佳剂量下的风味物质优化

对于核心的3轮次和5轮次基酒，其在最佳剂量下的感官提升主要归因于刺激性组分的选择性消除和关键酯类的再平衡（表2）。

3轮次基酒在4.55 kGy处理下，其关键风味物质发生了明显的“减量化”重构。新酒中导致燥辣感的乙醛浓度从498.97 mg/L锐减至

245.21 mg/L，降幅达50%以上；乙缩醛也从371.51 mg/L降至193.65 mg/L。同时，作为苦涩味和“上头感”来源指标的正丙醇，其含量从1 018.43 mg/L大幅降低至363.27 mg/L。值得注意的是，主要酯类和酸类也大幅减少，乙酸乙酯从4 094.10 mg/L降至1 815.78 mg/L，乙酸从2 713.25 mg/L降至1 479.71 mg/L。这种对主要刺激性组分和高含量骨架成分的大幅削减，使得3轮次酒体的粗糙感显著减弱，向更协调、醇和的方向演变。

表1　不同辐照剂量对各轮次酱香基酒总酸总酯的影响

Table 1　Effect of different irradiation dosages on total acidity and total esters of sauce-aroma base liquors from different rounds

轮次 Round	处理条件 Treatment	总酸 (以乙酸计) Total acidity (as acetic acid) / (g·L^{-1})	总酯 (以乙酸乙酯计) Total esters (as ethyl acetate) / (g·L^{-1})
1轮次	对照 (Control, 0 kGy)	5.26	8.93
Round 1	辐照 (Irradiation, 6.50 kGy)	5.06	7.84
3轮次	对照 (Control, 0 kGy)	3.68	6.43
Round 3	辐照 (Irradiation, 4.55 kGy)	2.24	4.42
5轮次	对照 (Control, 0 kGy)	2.19	4.87
Round 5	辐照 (Irradiation, 9.10 kGy)	2.26	4.45
7轮次	对照 (Control, 0 kGy)	1.64	4.94
Round 7	辐照 (Irradiation, 9.10 kGy)	1.63	4.13

与3轮次的剧烈变化形成鲜明对比，5轮次基酒在9.10 kGy的高剂量辐照下，其主要检测组分表现出较好的化学稳定性。表2数据显示，对照组与辐照组之间的乙醛、乙酸乙酯、乳酸乙酯以及正丙醇（397.47 *vs*. 390.54 mg/L）等主要物质含量几乎没有显著差异。这表明5轮次基酒能够有效缓冲高能射线的冲击。结合§2.2中感官品质的显著提升，推测5轮次的催陈效应可能并非源于主要骨架物质的显著增减，而是源于某些未被常规色谱检出的痕量关键风味物质的修饰，或是酒体中氢键缔合等物理状态的改变。

表2　辐照前后3轮次和5轮次基酒关键挥发性风味物质及有机酸对比

Table 2　Comparison of key volatile flavor compounds and organic acids in 3rd and 5th round liquors before and after irradiation

化合物类型 Category	化合物 Compound	3轮次 Round 3		5轮次 Round 5	
		0 kGy (Control)	4.55 kGy	0 kGy (Control)	9.10 kGy
醛酮类 / (mg·L^{-1})	乙醛 Acetaldehyde	498.97	245.21	287.99	276.50
Aldehydes & ketones	乙缩醛 Acetal	371.51	193.65	228.52	216.20
酯类 / (mg·L^{-1})	乙酸乙酯 Ethyl acetate	4 094.10	1 815.78	1 950.39	1 926.48
Esters	乳酸乙酯 Ethyl lactate	4 329.51	3 728.22	4 077.18	4 017.77
	己酸乙酯 Ethyl hexanoate	6.77	6.78	6.81	6.61
	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	15.35	8.54	9.00	8.88
醇类 / (mg·L^{-1})	正丙醇 n-Propanol	1 018.43	363.27	397.47	390.54
Alcohols	异丁醇 Isobutanol	244.06	126.09	137.28	134.80
	异戊醇 Isoamyl alcohol	263.89	252.39	271.47	271.76
有机酸 / (mg·L^{-1})	乙酸 Acetic acid	2 713.25	1 479.71	1 518.23	1 482.82
Organic acids	丙酸 Propionic acid	34.54	21.31	18.80	24.66
	丁酸 Butyric acid	22.48	19.47	19.77	19.28
	己酸 Caproic acid	12.43	12.61	12.65	12.64
	乳酸 Lactic acid	1 569.44	1 115.40	1 099.62	1105.47

2.3.3 头尾轮次（1、7轮次）最佳剂量下的基质特异性重构

1轮次和7轮次基酒具有显著差异的化学基质组成，在最佳剂量下表现出独特的化学演变模式（表3）。

1轮次基酒以极高浓度的醇酯为特征。在最佳剂量6.50 kGy下，尽管感官上酸涩感降低，但其主要化学基质保持了相对稳定。例如，含量极高的正丙醇仅从38 477.10 mg/L微调至36 506.65 mg/L，乙酸乙酯从7 091.95 mg/L变为6 425.43 mg/L，主要有机酸乙酸也保持稳定（4 658.77 *vs*. 4 570.52 mg/L）。这种高能环境下的稳定性表明，1轮次酒庞大的物质基数对其化学平衡构成了强大的缓冲，辐照可能主要通过微调痕量刺激性成分来改善口感，而非改变主体骨架。

相比之下，7轮次基酒在9.10 kGy高剂量下，其关键特征风味物质出现了显著的下降趋势。作为尾酒焦苦味来源指标之一的糠醛，从2.35 mg/L降低至1.65 mg/L。通常被认为带来苦杂味的高级醇类也显著降低，其中异戊醇从1 528.67 mg/L大幅降至991.77 mg/L。值得注意的是，具有花香特征的苯乙醇含量也从23.39 mg/L降低至15.10 mg/L，乙醛含量则从427.50 mg/L降至275.77 mg/L。理化数据表明，高剂量辐照对7轮次酒的作用是一种强烈的氧化降解过程，它并没有生成新的高含量香气物质，而是通过降低酒体中部分醛类、高级醇及芳香成分的含量，减弱了尾酒的粗糙感和杂味，使酒体呈现出刺激性成分减少后的柔和感与协调感。

表3 辐照前后1轮次和7轮次（头尾轮次）基酒关键挥发性风味物质及有机酸对比

Table 3 Comparison of key volatile flavor compounds and organic acids in 1st and 7th round (head and tail rounds) base liquors before and after irradiation

化合物类型 Category	化合物 Compound	1轮次 Round 1		7轮次 Round 7	
		0 kGy (Control)	6.50 kGy	0 kGy (Control)	9.10 kGy
特征组分 / (mg·L^{-1})	糠醛 Furfural	0.31	0.30	2.35	1.65
Characteristic components	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	4.23	4.03	23.39	15.10
醛酮类 / (mg·L^{-1})	乙醛 Acetaldehyde	173.81	160.50	427.50	275.77
Aldehydes & Ketones	乙缩醛 Acetal	137.68	126.40	213.57	211.55
酯类 / (mg·L^{-1})	乙酸乙酯 Ethyl acetate	7 091.95	6 425.43	3 086.45	3 265.55
Esters	乳酸乙酯 Ethyl lactate	1 750.24	1 664.56	2 376.44	1 560.84
	己酸乙酯 Ethyl hexanoate	6.73	6.70	6.96	6.74
醇类 / (mg·L^{-1})[1]	正丙醇 n-Propanol	38 477.10	36 506.65	2 291.72	2 299.87
Alcohols	异丁醇 Isobutanol	236.53	226.22	386.33	386.48
	异戊醇 Isoamyl alcohol	369.84	356.48	1 528.67	991.77
有机酸 / (mg·L^{-1})	乙酸 Acetic acid	4 658.77	4 570.52	1 356.13	1 422.97
Organic acids	丁酸 Butyric acid	29.31	29.33	30.60	32.29
	己酸 Caproic acid	12.37	12.34	13.36	13.41
	乳酸 Lactic acid	744.21	722.83	302.70	302.94

2.4 X射线辐照催陈的微观机理探讨

综合上述感官与理化分析，本研究认为X射线辐照加速酱香型白酒陈化是一个多因素耦合的物理化学过程，其核心机理在于高能光子引发的可控自由基链式反应网络，在微观层面模拟并加速了自然老熟中的关键化学过程。需要指出的是，本研究的白酒样品酒精度为53%（体积分数），乙醇在体系中的体积分数占比较高，因此乙醇分子不仅是微量风味组分的溶剂载体，更是辐射能量的主要受体之一，其直接辐射解离与水分子辐解协同驱动了后续的次级化学反应网络。

当高能X射线穿透酒体介质时，水分子和乙醇分子均可直接吸收辐射能量发生解离，原位产生大量高活性的初级自由基和分子产物[16]。

$$H_2O \rightarrow \cdot OH, \cdot H, e^-_aq, H_2, H_2O_2 \quad (1)$$

$$CH_3CH_2OH \rightarrow CH_3CH_2OH^+ + e^- \quad (2)$$

$CH_3CH_2OH^+ + CH_3CH_2OH \rightarrow CH_3CH_2OH_2^+ + CH_3\dot{C}HOH$ （3）

$CH_3CH_2OH^* \rightarrow CH_3\dot{C}HOH + H\bullet$ （4）

$\bullet OH + CH_3CH_2OH \rightarrow H_2O + CH_3\dot{C}HOH$ （5）

$\bullet H + CH_3CH_2OH \rightarrow H_2 + CH_3\dot{C}HOH$ （6）

$2\ CH_3\dot{C}HOH \rightarrow CH_3CHO + CH_3CH_2OH$ （7a）

$2\ CH_3\dot{C}HOH \rightarrow (CH_3CHOH)_2$ （7b）

在53%（体积分数）的高乙醇浓度下，乙醇分子的直接辐射化学效应不容忽视。乙醇的电离能（约10.5 eV）与水分子（约12.6 eV）相近，二者在X射线能量沉积过程中以近似正比于其电子分数的概率被电离激发。反应式（2~4）描述了乙醇直接吸收辐射能量后的电离脱氢过程：乙醇电离生成的阳离子自由基（$CH_3CH_2OH^+$）通过质子转移（3）生成α-羟乙基自由基（$CH_3\dot{C}HOH$），激发态乙醇分子（$CH_3CH_2OH^*$）也可经均裂脱氢（4）直接生成$CH_3\dot{C}HOH$。同时，水辐解产生的·OH和·H自由基通过氢抽取反应（反应式（5~6））进一步将乙醇转化为$CH_3\dot{C}HOH$，构成水→乙醇的选择性能量传递通道。$CH_3\dot{C}HOH$的终止方式决定了主要辐解产物的分布：歧化反应（7a）生成乙醛，二聚反应（7b）生成2，3-丁二醇，后者因含两个手性碳原子而存在光学异构体，其异构体分布可作为辐照历史的重要指示物[17]。

上述水分子和乙醇分子辐解产生的初级自由基通过氢抽提、加成、歧化和复合等反应路径，驱动了后续复杂的次级化学反应网络。戚生初等[16-18]系统研究了酒类及其模式体系（乙醇-水溶液）在γ射线辐照下的辐射化学行为，发现辐照酒中过氧化物的G值在1.0~3.6之间，且有机过氧化物来源于酒中微量有机组分的自由基反应[16, 18]。需要指出的是，在53%（体积分数）的高乙醇浓度下，乙醇直接辐解产生的$CH_3\dot{C}HOH$自由基将显著贡献于总自由基池，与水的辐解自由基（·OH、·H、e^-_aq）协同作用于微量风味组分的氧化降解。同时，辐照诱导产生的2，3-丁二醇等邻二醇类产物的光学异构体分布特征为揭示自由基反应路径提供了重要线索[17]。这些先驱性工作为本研究理解X射线辐照下白酒体系的自由基化学过程奠定了重要理论基础。理化数据证实，辐照催陈的本质通常是一个以自由基驱动的降解反应为主导的“再平衡”过程，而非简单的物质增加。具体而言，·OH自由基（氧化电位高达2.80 V）作为非选择性氧化剂，优先攻击醛类（如乙醛的羰基碳）、高级醇（如正丙醇的α-C−H键）和酯类（如乙酸乙酯的酯键）等具有较高反应活性的官能团，通过氢抽提和电子转移等机制实现这些刺激性风味组分的选择性降解。生成的前驱体自由基进一步通过歧化、复合等反应转化为更稳定的产物，从而在宏观上表现出刺激性风味的减弱和酒体协调性的提升[16, 18]。

对于3轮次和7轮次基酒，辐照产生的高氧化环境促使不稳定的醛类（如乙醛）、易氧化的醇类（如正丙醇、异戊醇）以及部分酯类发生显著的降解或转化反应。这种快速的“去杂”和骨架物质浓度的降低，模拟了自然陈酿中风味物质的缓慢挥发和转化，从而降低了酒体的刺激性和粗糙感。而对于物质基底更为厚重、稳定的1轮次和5轮次基酒，其主要化学骨架对辐照表现出较强的耐受性，高能射线可能更多地作用于痕量敏感组分的修饰或促进分子间缔合，从而在维持原有风格特征的基础上实现口感的优化。因此，本研究所指的"最佳剂量"，实质上是针对特定轮次基酒的化学基质，找到一个既能最大程度引发有益的“去杂与平衡”反应，又能避免过度氧化导致酒体风味结构严重破坏的能量平衡点。

3 结论

本研究论证了X射线辐照技术在加速酱香型白酒不同轮次基酒老熟中的应用潜力与微观作用机制，主要得出以下结论。

（1）证实了72 Gy/sX射线辐照具有阈值效应，且不同轮次基酒存在特异性剂量窗口：X射线辐照对酒体品质的影响存在明显的剂量分水岭，且不同轮次基酒的最佳催陈剂量窗口显著不同。1轮次基酒在6.50 kGy剂量下糙辣感与苦味降低、酒体趋于柔和；3轮次核心基酒在4.55 kGy剂量下糙辣感显著减弱、酯香与陈香提升；5轮次核心基酒在9.10 kGy剂量下酱香馥郁度与烘焙香增强、酒体更加圆润丰满；7轮次尾酒在9.10 kGy剂量下焦糊味改善、酯香大幅提升。这充分表明，在实际应用中，为不同轮次基酒精准匹配特异性剂量窗口是物理催陈成功的关键。

（2）揭示了·OH自由基驱动的选择性降解去杂机制：挥发性组分分析证实，X射线催陈的核心机制之一在于辐照产生的·OH自由基（氧化电位2.80 V）对刺激性风味物质的高效选择性降解。在适宜剂量下，导致酒体“燥辣”的低沸点醛类和

导致“苦涩”的高级醇（如正丙醇、异戊醇，在7轮次中异戊醇从1 528.67 mg/L降至991.77 mg/L，降幅达35.1%）由于含有易被·OH攻击的活性官能团（羰基、α-C−H键），在自由基链式反应中发生优先降解，从而赋予了酒体柔和、纯净的口感。

（3）阐明了基于化学基质差异的催陈响应轮次特异性：不同发酵轮次的基酒因其化学基质组成的巨大差异，对X射线的敏感度和响应路径呈现显著不同。3轮次（最佳剂量4.55 kGy）作为核心基酒，主要表现为主要骨架成分的大幅减量重构（乙醛降幅50.8%、正丙醇降幅64.3%），实现柔和化转变；5轮次（最佳剂量9.10 kGy）则表现出优异的化学稳定性，其催陈效应可能源于痕量组分的自由基修饰或分子间氢键缔合状态的改变；1轮次（最佳剂量6.50 kGy）因其极高的物质浓度基数表现出较强的缓冲能力，主要通过微调实现口感改善；7轮次（最佳剂量9.10 kGy）则经历强烈氧化降解，异戊醇和糠醛等焦苦味来源物质被有效清除，实现尾酒品质提升。

综上所述，低剂量X射线不仅能有效缩短酱香型白酒的陈酿周期，还有望针对不同轮次基酒的天然风味差异进行定制化修饰。在本研究确认的各轮次即时催陈效果基础上，后续将进一步追踪辐照后贮藏期内的风味稳定性与长期陈化效应，将有助于推动该技术从实验室验证走向工业化应用。但需指出，根据我国现行法规（GB 18524—2016及GB 14891系列标准），白酒辐照与生产销售尚未获得许可，本研究仅属基础研究范畴。

作者贡献声明 黄江、涂荣坤提出研究思路，禄凌飞、戴秋涟、郑蕾设计研究方案；李浩哲完成论文初稿撰写；张云博完成了仿真模拟；沈小娟、毛豪提供数据分析指导；黄江对论文初稿进行修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Yan Q, Zhang K Z, Zou W, *et al*. Three main flavour types of Chinese Baijiu: characteristics, research, and perspectives[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2021, **127**(4): 317-326. DOI: 10.1002/jib.669.

2 Sun J Y, Zhu Y M, Wang P Y, *et al*. Research progress in the flavor chemistry and health effects of Baijiu[J]. Agricultural Products Processing and Storage, 2025, **1**: 2. DOI: 10.1007/s44462-025-00010-y.

3 王婧, 王晓丹, 邱树毅, 等. 酱香型白酒酿造体系风格特征形成探究[J]. 酿酒, 2015(4): 99-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2015.04.028.
WANG Jing, WANG Xiaodan, QIU Shuyi, *et al*. Advances in research on the formation of Maotai-flavor liquor brewing system features[J]. Liquor Making, 2015 (4): 99-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2015.04.028.

4 苏正, 彭伟, 杨博, 等. 酱香型白酒酿造工艺的研究进展[J]. 酿酒, 2024, **51**(6): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2024.06.006.
SU Zheng, PENG Wei, YANG Bo, *et al*. Research progress of brewing technology of Maotai flavor Baijiu [J]. Liquor Making, 2024, **51**(6): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2024.06.006.

5 朱晓春, 吴兰, 尚煜豪, 等. 酱香型白酒轮次基酒感官特征及挥发性成分差异规律分析[J]. 中国酿造, 2025, **44** (6): 32-39. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2025.06.006.
ZHU Xiaochun, WU Lan, SHANG Yuhao, *et al*. Sensory characteristics and the difference law of volatile components in rounds base liquor of sauce-flavor Baijiu [J]. China Brewing, 2025, **44**(6): 32-39. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2025.06.006.

6 何庆, 唐克纯, 韩秋月, 等. 白酒陈化机理及陈化方法研究进展[J]. 中国酿造, 2023, **42**(7): 7-12. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2023.07.002.
HE Qing, TANG Kechun, HAN Qiuyue, *et al*. Research progress on aging mechanism and aging methods of Baijiu[J]. China Brewing, 2023, **42**(7): 7-12. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2023.07.002.

7 Wang L L, Zhao T F, Han Y H, *et al*. Tracking the evolution of volatile aroma compounds in Baijiu during storage: quantitative insights into temperature, oxygen, and pottery influences[J]. Food Chemistry, 2026, **501**: 147534. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.147534.

8 付立新, 孟丽芬, 许德春, 等. 辐射加速白酒陈化研究[J]. 吉林农业大学学报, 1994, **16**(3): 67-70.
FU Lixin, MENG Lifen, XU Dechun, *et al*. Study on quicken white spirits mellowness by irradiation[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1994, **16**(3): 67-70.

9 白雪, 刘有智, 袁志国. 白酒催陈技术的发展与应用现状[J]. 中国酿造, 2009, **28**(11): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.0254-5071.2009.11.001.
BAI Xue, LIU Youzhi, YUAN Zhiguo. Development and application of liquor aging technology[J]. China Brewing, 2009, **28**(11): 1-5. DOI: 10.3969/j. issn. 0254-

5071.2009.11.001.

10 王本盛, 张莉丽, 赵瑞, 等. 高能电子束辐照酱香型白酒的催陈效应[J]. 食品科技, 2021, **46**(9): 79-86.
WANG Bensheng, ZHANG Lili, ZHAO Rui, *et al*. Aging effect of Maotai-flavor liquor irradiated by high energy electron beam[J]. Food Science and Technology, 2021, **46**(9): 79-86.

11 林平, 李咏富, 唐洪涛, 等. ^{60}Co-γ射线辐照处理的酱香型白酒及其香气成分的变化[J]. 现代食品科技, 2021, **37**(10): 230-236. DOI: 10.13982/j. mfst. 1673-9078.2021.10.0132.
LIN Ping, LI Yongfu, TANG Hongtao, *et al*. Maotai-flavor liquor processed by ^{60}Co- γ ray irradiation and changes of its aroma components[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, **37**(10): 230-236. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.10.0132.

12 Sadler G, Chappas W, Pierce D E. Evaluation of e-beam, γ - and X-ray treatment on the chemistry and safety of polymers used with pre-packaged irradiated foods: a review[J]. Food Additives and Contaminants, 2001, **18**(6): 475-501. DOI: 10.1080/02652030119263.

13 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 使用辐射显色薄膜和聚甲基丙烯酸甲酯剂量测量系统测量吸收剂量的标准方法: GB/T 15053—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard method for using radiochromic film and polymethylmethacrylate dosimetry system to measure absorbed dose: GB/T 15053—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

14 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 白酒质量要求 第4部分: 酱香型白酒: GB/T 10781.4—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Quality requirements for baijiu — Part 4: sauce-flavor baijiu: GB/T 10781.4—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

15 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 白酒分析方法: GB/T 10345—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Method of analysis for baijiu: GB/T 10345—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

16 戚生初, 吴季兰. 酒的辐射化学 I: 辐照酒中过氧化物生成的研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1985, **3**(1): 1-8.
QI Shengchu, WU Jilan. Radiation chemistry of alcoholic beverages I: Study on peroxide formation in irradiated liquor[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1985, **3**(1): 1-8.

17 戚生初, 吴季兰, 魏金山. 酒的辐射化学 II: 辐照酒中2, 3-丁二醇光学异构体的分布[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1986, **4**(2): 8-15.
QI Shengchu, WU Jilan, WEI Jinshan. Radiation chemistry of alcoholic beverages II: Distribution of optical isomers of 2, 3-butanediol in irradiated liquor[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1986, **4**(2): 8-15.

18 戚生初, 苑绍华, 吴季兰. 酒的辐射化学: III. 薯干白酒辐照时过氧化物生成[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1991, **9**(3): 150-155.
QI Shengchu, YUAN Shaohua, WU Jilan. Radiation chemistry of liquor: III. the formation of peroxide on the irradiation of liquor made from dried sweet potato[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1991, **9**(3): 150-155.