

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.21038

施氮量对糯和非糯小麦原粮品质、酿酒品质及挥发性风味物质的影响

刘 琼^{1,2,3} 杨洪坤^{1,2} 陈艳琦^{1,2} 吴东明^{1,2} 黄秀兰^{1,2} 樊高琼^{1,2,*}

¹ 西南作物基因资源发掘与利用国家重点实验室, 四川成都 611130; ² 农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川成都 611130; ³ 四川省内江市市中区龙门镇人民政府农业综合服务中心, 四川内江 641000

摘 要: 为研究不同施氮量对糯和非糯小麦原粮品质及酿酒品质的影响, 明确酿酒专用小麦高产优质生产的适宜氮肥用量。于 2019、2020 连续 2 年在四川省成都市大邑县, 以绵麦 902 (非糯性) 和中科紫糯麦 168 (糯性) 为材料, 设置 6 个施氮量(0、45、90、135、180 和 225 kg hm⁻²), 分析其对小麦原粮品质、酿酒品质和挥发性风味物质的影响。结果表明: 绵麦 902 产量、粉质率、灰分含量更高; 中科紫糯麦 168 硬度、容重、蛋白质、脂肪含量相对较高, 总淀粉和支链淀粉含量更高、直支比更低, 除稀糊值比绵麦 902 高以外, 其余 RVA 特征参数均更低。增加施氮量显著提高小麦产量, 两品种产量均在 225 kg hm⁻² 达最大值。粉质率和容重随施氮量增加而降低, 硬度指数和蛋白质随施氮量增加而升高; 脂肪和灰分含量在 135 kg hm⁻²、总淀粉和支链淀粉含量在 90~135 kg hm⁻² 内较高, 峰值黏度、低谷黏度在 135 kg hm⁻² 后显著下降。两品种的出酒率年际间不同, 2019 年绵麦 902 的出酒率要显著高于中科紫糯麦 168, 2020 年则相反, 推测与 2020 年灌浆期雨水较多, 中科紫糯麦 168 籽粒硬度指数下降、粉质率上升有关; 在 90~135 kg hm⁻² 施氮范围内两品种出酒率相对较高。绵麦 902 所酿制的白酒总酸、总酯含量不高, 杂醇油含量也相对更低; 中科紫糯麦 168 与之相反, 但杂醇含量仍在安全范围(≤ 0.2 g 100 mL⁻¹)。两年度绵麦 902 所酿白酒的总酸含量均在 90 kg hm⁻² 处理下最高, 2020 年中科紫糯麦 168 的总酸含量则在 135 kg hm⁻² 处理下最高。就总酯和杂醇油而言, 两品种的总酯含量在 135 kg hm⁻² 处理下相对较低, 杂醇油含量在 90 kg hm⁻² 下最低。与 2019 年相比, 2020 年两品种的总酸、总酯含量显著降低, 这可能与该年度籽粒灌浆期降水较多, 总淀粉、支链淀粉含量下降有关。中科紫糯麦 168 挥发性风味物质的种类和数量更多, 整体酿酒特性要优于绵麦 902。绵麦 902 的挥发性风味物质数量在 90 kg hm⁻² 处理最高, 综合评分最高, 中科紫糯麦 168 的挥发性风味物质数量在 225 kg hm⁻² 处理最高, 综合评分最高。相关性分析和通径分析表明: 总淀粉含量和支链淀粉含量与总酸、总酯含量呈极显著正相关关系, 大多数淀粉理化指标通过直链淀粉、糊化温度等在总酯形成过程中起正向间接作用。研究认为, 小麦出酒率受环境、粉质率影响, 淀粉含量、组分、糊化特性对总酸、总酯的形成具有重要影响, 酯类物质是挥发性风味物质主要成分, 受品种因素影响较大。90~135 kg hm⁻² 施氮量下, 糯和非糯小麦淀粉含量、组分和糊化特性较好, 酿制白酒挥发性风味物质较多, 是适宜酿酒小麦高产优质的适宜施氮量。

关键词: 施氮量; 糯小麦; 非糯小麦; 原粮品质; 酿酒品质; 挥发性风味物质

Effect of nitrogen application rate on grain quality, wine quality and volatile flavor compounds of waxy and no-waxy wheat

LIU Qiong^{1,2,3}, YANG Hong-Kun^{1,2}, CHEN Yan-Qi^{1,2}, WU Dong-Ming^{1,2}, HUANG Xiu-Lan^{1,2}, and FAN Gao-Qiong^{1,2,*}

¹ State Key Laboratory of Crop Gene Exploration and Utilization in Southwest China, Ministry of Science and Technology, Chengdu, 611130 Sichuan, China; ² Southwest Key Laboratory of Crop Physiological Ecology and Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 611130, Sichuan,

本研究由四川省十四五重点研发项目(2021YFYZ0002)和四川省科技支撑计划项目(2021YJ0504)资助。

This study was supported by the 14th Five-Year Key Research and Development Program of Sichuan Province (2021YFYZ0002) and the Sichuan Province Science and Technology Support Program (2021YJ0504).

* 通信作者(Corresponding author): 樊高琼, E-mail: fangao20056@126.com

第一作者联系方式: E-mail: 1362241703@qq.com

Received (收稿日期): 2022-05-30; Accepted (接受日期): 2023-02-10; Published online (网络出版日期): 2023-02-27.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20230224.1901.006.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

China; ³ Longmen Town People's Government Agricultural Comprehensive Service Center, Shizhong District, Neijiang City, Sichuan Province, Neijiang 641000, Sichuan, China

Abstract: In order to study the effects of different nitrogen application rates on the quality of waxy and non-waxy wheat and brewing quality, the suitable nitrogen application rate for high yield and high-quality production of wheat for brewing was determined. Mianmai 902 (non-waxy) and Zhongkezinuomai 168 (waxy) were used as the experimental materials in Dayi County, Chengdu City, Sichuan Province, in 2019 and 2020. Six nitrogen application rates (0, 45, 90, 135, 180, and 225 kg hm⁻²) were set to analyze their effects on the quality of wheat raw grain, brewing quality, and volatile flavor compounds. The results showed that the yield, flour quality rate, and ash content of Mianmai 902 were higher. Zhongkezinuomai 168 had higher hardness, bulk density, protein, and fat content, higher total starch and amylopectin content, lower straight branch ratio, and lower RVA characteristic parameters except that breakdown value was higher than that of Mianmai 902. Increasing nitrogen application rate significantly increased wheat yield, and the yield of both varieties reached the maximum at 225 kg hm⁻². Silty rate and bulk density decreased with the increase of nitrogen application rate, while hardness index and protein content increased. Fat and ash content were higher in 135 kg hm⁻², the total starch and amylopectin content were higher in 90–135 kg hm⁻², peak viscosity and trough viscosity decreased significantly after 135 kg hm⁻². The wine yield of the two varieties was higher in the range of 90–135 kg hm⁻² nitrogen application, but the inter-annual difference was different. The wine yield of Mianmai 902 was significantly higher than that of Zhongkezinuomai 168 in 2019, and the opposite was true in 2020. We speculated that it was related to the more rain at filling stage in 2020, the decrease of grain hardness index and the increase of silty rate of Zhongkezinuomai 168. The content of total acid and total ester in liquor brewed by Mianmai 902 was not high, and the content of fusel oil was relatively low. Zhongkezinuomai 168 was the opposite, but the fusel content was still in the safe range (≤ 0.2 g 100 mL⁻¹). The total acid content of liquor produced by Mianmai 902 was the highest under the treatment of 90 kg hm⁻² in the two years, and the total acid content of Zhongkezinuomai 168 was the highest under the treatment of 135 kg hm⁻² in 2020. In terms of total ester and fusel oil, the total ester content of the two varieties was relatively low under 135 kg hm⁻² treatment, and the fusel oil content was the lowest under 90 kg hm⁻² treatment. Compared with 2019, the contents of total acid and total ester of the two varieties decreased significantly in 2020, which may be related to more precipitation at grain filling stage and the decrease of total starch and amylopectin contents. Zhongkezinuomai 168 had more kinds and quantities of volatile flavor substances, and its overall brewing characteristics were better than that of Mianmai 902. The number of volatile flavor compounds of Mianmai 902 was the highest at 90 kg hm⁻², and the comprehensive score was the highest. The number of volatile flavor compounds of Zhongke Zinuomai 168 was the highest at 225 kg hm⁻², and the comprehensive score was the highest. Correlation analysis and path analysis showed that total starch content and amylopectin content were significantly positively correlated with the total acid and total ester content. Most starch physicochemical indexes played a positive indirect role in the formation of the total ester through amylose and gelatinization temperature. The results showed that the wine yield of wheat was affected by interannual factors and flour quality rate. Starch content, composition, and gelatinization characteristics had important effects on the formation of total acid and total ester, esters were the main components of volatile flavor substances, greatly affected by variety factors. Under the nitrogen application rate of 90–135 kg hm⁻², waxy and non-waxy wheat had better starch content, composition and pasting properties, and more volatile flavor substances in liquor-making, which was suitable for high yield and high quality of liquor-making wheat.

Keywords: nitrogen rate; waxy wheat; no-waxy wheat; grain quality; wine quality; volatile flavor compounds

西南地区是我国主要白酒生产带,四川也从战略高度提出打造白酒金三角,提升川酒核心竞争力。促进白酒提档升级亟需加强酿酒专用粮生产基地建设,品种和栽培技术创新更是稳定原粮品质的重要一环。出酒率、酸酯类物质和挥发性风味物质的种类和含量是评价酿酒品质的重要指标。小麦作为酿酒原粮之一,研究小麦原粮品质与酿酒品质及挥发性风味物质间的关系,对于对接千亿级白酒产业需求,采取合理栽培措施提质增效,促进小麦酿酒专用性和提升附加值、发展区域经济具有重要意义^[1]。

酿酒主要是将粮食中的淀粉经过发酵产生酒精的过程,因而小麦的淀粉品质必然对酿酒品质有重要影响。前人研究认为糯小麦更加适合酿酒,原因是糯小麦不含直链淀粉或直链淀粉含量极低,具有

黏度高,膨胀势大,易糊化,糊化温度低,抗回生能力强的特点,糖化效果要优于普通小麦,能够提高出酒率和改善白酒风味^[2-10]。对于白酒风味研究,则集中在风味物质成分鉴定方面。仲婧宇等^[11]运用毛细管柱气相色谱技术,使用内标法定量,建立了毛细管气相色谱同时测定白酒中的甲醇和杂醇油、乙酸乙酯和己酸乙酯的分析方法;Fan等^[12-13]发现洋河大曲中对香气贡献最大的脂肪酸为己酸和丁酸,酯类化合物为己酸乙酯、丁酸乙酯和戊酸乙酯,醇类化合物为2-丁醇、异戊醇、2-戊醇和己醇,五粮液和剑南春中则为异戊醇;Pino^[14]发现不同酒龄朗姆酒的挥发性物质中存在异丁醇、2-壬醇、3-己醇等高级醇。但酒企在小麦原粮选择上使用更多的是普通小麦即非糯小麦,在高粱选择上则趋向糯高粱。关

于糯和非糯小麦的酿酒特性还需要进一步论证。同时,就不同企业而言,对小麦原粮标准要求也有差异,如宜宾五粮液酒(浓香型)规定小麦籽粒淀粉干基 $\geq 75\%$ [15],贵州茅台酒(酱香型)则要求小麦粗淀粉含量 $\geq 60\%$,粗蛋白含量 $\geq 10\%$ [16]。小麦原粮品质对酿酒特性及风味的影响也需要进一步研究。

增施氮肥是提升小麦产量,增加蛋白质含量的重要栽培措施[17-26],也会影响到淀粉的含量和组分、粒度分布,进而改变其糊化特性和晶体特征[27-29]。目前酿酒的研究多集中在酿酒微生物、糖化发酵、酿酒品质及挥发性风味物质鉴定等方面[12-14,30-33],有关淀粉理化特性对酿酒适宜度及风味的影响未知。基于此,本研究选择糯和非糯 2 种类型小麦,研究不同施氮量对其原粮品质、酿酒品质和挥发性风味物质的影响,以期为四川省生产优质酿酒专用小麦提供合理的氮肥管理措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2019、2020 连续 2 年在四川省成都市大邑县同一块试验田(30.58°N, 103.53°E)进行,属于川西平原麦区,亚热带湿润气候。两年度小麦生育期降雨量分别为 99.4 mm 和 452.4 mm,平均气温分别为 11.6℃、11.7℃,小麦生育期气象条件见图 1,试验地种植制度为冬小麦-水稻轮作。供试土壤(0~20 cm)基础理化性状如表 1 所示。

1.2 试验材料

供试材料为绵麦902 (非糯性,弱筋,春性,绵阳市农业科学研究院提供)和中科紫糯麦168 (糯性,中弱筋,春性,中国科学院成都生物研究所提供)。供试肥料为尿素(N 46.2%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12.5%)和氯化钾(K₂O 60%)。

表 1 试验地土壤基础地力(0~20 cm)

Table 1 Soil basic fertility of experimental field (0~20 cm)

年份 Year	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)
2019	5.6	38.5	2.04	153.7	23.5	221.3
2020	6.2	39.5	3.44	149.6	25.5	224.4

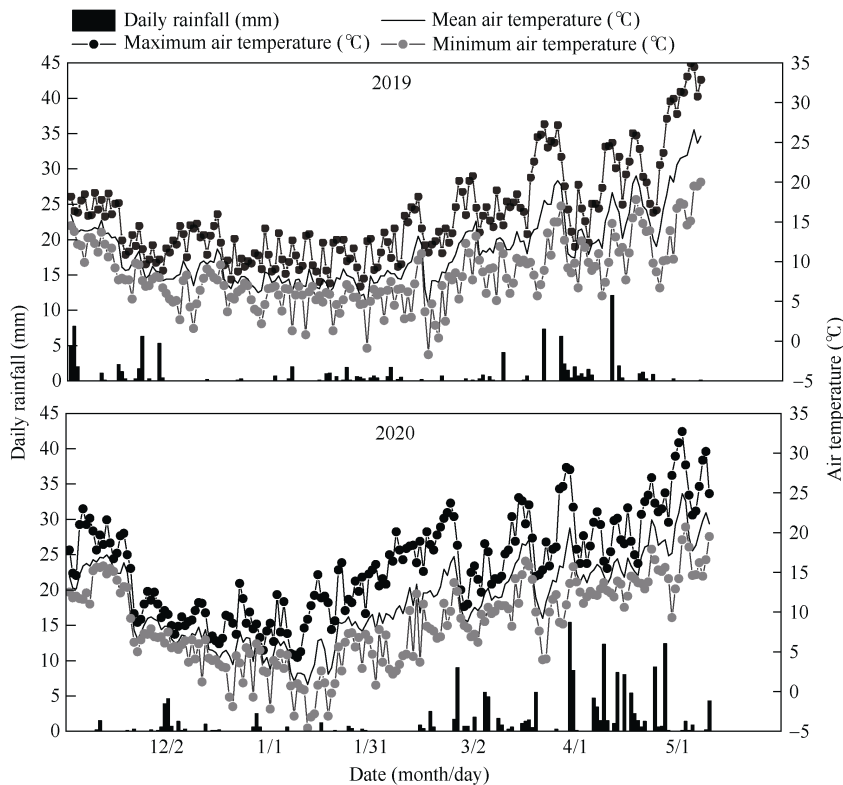


图 1 小麦生育期气温和降雨量

Fig. 1 Temperature and rainfall in wheat growth period

1.3 试验设计

本试验采用二因素裂区设计, 主区为小麦品种; 副区为氮水平, 施氮量分别为 0 (N_0)、45 (N_{45})、90 (N_{90})、135 (N_{135})、180 (N_{180})和 225 (N_{225}) kg hm^{-2} , 每个处理 3 次重复, 小区面积 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)。磷肥和钾肥用量均为 75 kg hm^{-2} 。各处理将氮肥 45 kg hm^{-2} (N_0 除外)与磷肥、钾肥一起施入作基肥, 剩余氮肥于四叶一心时(2 年追肥时叶龄一致)施入。采用旋耕条播, 行距 20 cm , 基本苗 225×10^4 株 hm^{-2} 。病虫害防治参照当地管理惯例进行。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 籽粒淀粉含量及组分、面粉 RVA 谱特征参数

将收获的籽粒自然晾干水分至 12.5% 以下, 每个样品袋中放入防虫药后装进小型粮食储藏密封袋, 后熟 2 个月后磨粉, 测定总淀粉含量和直链淀粉含量, 以及面粉 RVA 谱特征参数^[34]。总淀粉含量采用蒽酮-硫酸比色法^[35]; 直链淀粉含量参照 GB7648-1987^[36]测定, 支链淀粉含量为两者的差值。

1.4.2 产量、其他原粮品质指标 于小麦成熟期收获 1 m^2 调查有效穗数, 并随机取 30 穗调查穗粒数。按小区人工收获籽粒并脱粒, 自然晾干后称重测产量(以 13% 标准水分换算)。采用 H_2SO_4 消煮, 凯氏定氮法测定蛋白质含量, 蛋白质含量($\%$)=含氮量($\%$) $\times 5.7$ ^[37]; 粗脂肪含量参照 GB 5009.6-2016 采用索氏抽提法测定^[38]; 灰分含量参照 GB 5009.4-2016 测定^[39]。粉质率用感官检验法进行测定: 玻璃状透明体占本籽粒截面 $1/2$ 以上的小麦定义为角质粒, $< 1/2$ 的小麦为粉质粒。粉质粒的总数占所取样品粒数的百分数即小麦粉质率, 软质小麦粉质率不低于 70% ^[40]。硬度指数参照 GB/T 21304-2007 采用硬度指数测定仪(金科牌, 型号 JYDX 100×40)测定^[41]。容重参照 GB/T 5498-2013 用谷物容重测定仪(农奥牌, 型号 GHCS-1000 AP)测定^[42]。

1.4.3 酿酒流程 参照赵国君等^[6]的方法进行实验室小规模酿酒(奥尼亚牌发酵蒸酿一体机, 型号 JB5A, 5 L)。采用固态培菌、熟料发酵、固态蒸馏的方法, 此法与四川传统小曲酒生产工艺接近。具体步骤如下: (1) 泡粮: 称取 1000 g 小麦, 加入蒸馏水淹没约 5 cm , 泡粮 12 h , 泡粮完毕冲去灰渣酸水。蒸粮: 待蒸粮水充分沸腾, 充满蒸汽时开始计时, 蒸至软硬适中, 粮粒裂口率 85% 以上, 约 2 h 。(2) 摊凉、下曲: 将蒸好的粮食刮平、摊凉, 40°C 下曲(彭州市华西酒曲厂, 华西牌淀粉质原料小曲法白酒酒曲),

下曲量: $1000 \times 0.35\% = 3.5 \text{ g}$ 。糖化培菌: 搅拌均匀后, 30°C 恒温糖化培菌 24 h 。(3) 发酵: 糖化培菌 24 h 后, 30°C 恒温密闭发酵 7 d 。(4) 蒸馏: 发酵完毕, 蒸馏出酒。

1.4.4 白酒出酒率、总酸、总酯、杂醇油含量的测定 用精密酒精计(创纪美牌, 型号 CJM-091)测样品酒精度, 并根据其酒精度计算出酒率(以 60 度白酒浓度为标准), 出酒率=出酒量/粮食用量。总酸用中和滴定法测定, 含量以乙酸含量计; 总酯的测定采用皂化-中和滴定法, 含量以乙酸乙酯含量计^[43]。分析样品在 520 nm 的光吸收值, 根据标准曲线推算杂醇油含量^[43]。

1.4.5 白酒挥发性风味物质测定 使用岛津气质联用仪(岛津, 型号 GCMS-QP 2010Ultra)对 2019 年的样品进行风味物质测定。样品处理: 本次试验测定样为白酒, 称取混匀后的样品约 3.00 g , 于 10.0 mL 顶空瓶中, 60°C 水浴平衡 5 min , 顶空萃取。仪器条件: 色谱柱: Rtx-WAX ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$); 进样口温度: 240°C ; 程序升温: 初始柱温 45°C , 保持 3 min ; 以 3°C min^{-1} 升温至 180°C , 保持 3 min ; 再以 $12^\circ\text{C min}^{-1}$ 升温至 220°C , 保持 3 min 。载气: 高纯氮, 柱流量: 1.67 mL min^{-1} 。进样方式: 顶空萃取针手动进样。电离方式: 电子轰击电离源(EI); 离子源温度: 200°C ; 接口温度: 240°C ; 检测方式: 离子全扫描; 溶剂延迟: 3 min 。

1.5 统计分析

运用 Microsoft Excel 2013 处理数据; 用 Origin 2018 作图; 用 DPS7.05 进行 Pearson 相关分析和差异显著性检验(LSD 法), 用 SPSS 27 对挥发性风味物质的组分和相对含量进行主成分因子分析后, 根据变量的载荷系数来反映白酒中挥发性风味成分对各主成分的影响程度, 载荷系数绝对值越大则表明该变量对主成分的贡献也越大, 由此统计出白酒中最具代表性的各类风味物质成分。

2 结果与分析

2.1 施氮量对糯和非糯小麦淀粉含量及组分、直支比的影响

由表 2 可知, 品种因素是影响淀粉含量及组分、直支比的首要因子, 施氮量也显著或极显著影响直链淀粉含量、直支比; 品种和施氮量对直支比的影响在 2 个年度下互作效应显著。绵麦 902 的直链淀粉含量、直支比更高, 中科紫糯麦 168 的总淀粉、

表 2 施氮量对糯和非糯小麦淀粉含量及组分的影响
Table 2 Effect of nitrogen application rate on starch content and components of waxy and no-waxy wheat

年份 Year	品种 Variety	施氮量 Nitrogen application rate	总淀粉 Total starch (%)	直链淀粉 Amylose (%)	支链淀粉 Amylopectin (%)	直支比 Amylose/Amylopectin
2019	M902	N ₀	60.7 a	11.63 bcd	49.07 ab	0.24 de
		N ₄₅	60.6 a	10.87 d	49.70 a	0.22 e
		N ₉₀	59.9 ab	12.37 ab	47.57 bc	0.26 bc
		N ₁₃₅	58.4 bc	11.54 cd	46.85 cd	0.25 cd
		N ₁₈₀	57.7 c	13.01 a	44.72 e	0.29 a
		N ₂₂₅	57.5 c	12.26 abc	45.22 de	0.27 ab
		平均 Mean	59.1	11.95	47.19	0.254
	Z168	N ₀	68.0 b	2.22 a	65.80 b	0.03 a
		N ₄₅	71.7 a	2.82 a	68.90 a	0.04 a
		N ₉₀	72.8 a	2.57 a	70.22 a	0.04 a
		N ₁₃₅	69.3 b	2.38 a	66.92 b	0.04 a
		N ₁₈₀	68.9 b	2.30 a	66.56 b	0.03 a
		N ₂₂₅	67.6 b	2.12 a	65.50 b	0.03 a
		平均 Mean	69.7	2.40	67.30	0.036
	F-value	小麦品种 V	1645.08**	779.22 **	1274.35**	885.79**
		施氮量 N	13.59**	2.91 *	12.86**	5.26**
		V×N	4.82**	5.71 **	5.30**	7.10**
2020	M902	N ₀	55.6 a	10.89 bc	44.75 a	0.24 c
		N ₄₅	55.2 a	10.62 c	44.59 a	0.24 d
		N ₉₀	56.0 a	11.31 a	44.67 a	0.25 a
		N ₁₃₅	55.5 a	11.19 ab	44.30 a	0.25 a
		N ₁₈₀	54.9 a	11.01 ab	43.85 a	0.25 ab
		N ₂₂₅	55.1 a	10.94 b	44.15 a	0.25 b
		平均 Mean	55.4	11.00	44.38	0.248
	Z168	N ₀	61.7 b	1.93 b	59.77 b	0.03 a
		N ₄₅	62.6 ab	2.09 ab	60.52 ab	0.03 a
		N ₉₀	62.8 ab	2.09 ab	60.65 ab	0.03 a
		N ₁₃₅	63.7 a	2.25 a	61.48 a	0.04 a
		N ₁₈₀	62.8 ab	2.13 ab	60.62 ab	0.04 a
		N ₂₂₅	61.9 b	2.00 ab	59.90 b	0.03 a
		平均 Mean	62.6	2.1	60.49	0.034
	F-value	小麦品种 V	1133.35**	10,205.66**	16,249.72**	26,417.45**
		施氮量 N	1.62	4.19**	1.36	9.30**
		V×N	1.43	2.19	1.94	5.73**

同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$ 。M902: 绵麦 902; Z168: 中科紫糯麦 168。表中 N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀、N₂₂₅ 表示施氮量分别为 0、45、90、135、180、225 kg hm⁻²。
Different lowercase letters following data within the same column of same variety mean significant differences among treatments at $P < 0.05$. *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$. M902: Mianmai 902; Z168: Zhongkezimuomai 168; V: wheat variety; N: nitrogen application rate. N₀, N₄₅, N₉₀, N₁₃₅, N₁₈₀, and N₂₂₅ in the table indicate that the nitrogen application rates are 0, 45, 90, 135, 180, and 225 kg hm⁻², respectively.

支链淀粉含量更高。但与 2019 年相比, 2020 年两品种的总淀粉含量及组分、直支比均出现不同程度的下降。低氮(N₄₅、N₉₀)下的总淀粉含量和支链淀粉含量相对较高, 绵麦 902 的直支比有随施氮量增加而增加的趋势, 在 N₄₅ 下的直支比最低, 但由于中科紫糯麦 168 直链淀粉含量相对较低, 故施氮量对其直

支比没有显著影响。
2.2 施氮量对糯和非糯小麦淀粉 RVA 谱特征参数的影响
由表 3 可知, 品种因素是影响小麦淀粉 RVA 谱特征参数的主导因素, 施氮量也显著或极显著影响峰值黏度、稀懈值、最终黏度、回升值、峰值时间。

品种×施氮量的互作效应在峰值黏度、低谷黏度和最终黏度上表现显著或极显著。绵麦 902 有更高的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、回升值、峰值时间和糊化温度, 中科紫糯麦 168 则具有更高的稀懈值。

2020 年绵麦 902 除糊化温度外, 其余参数较 2019 年出现不同程度下降, 中科紫糯麦 168 的稀懈值、峰值时间、糊化温度也有下降, 但低谷黏度、最终黏度、回生值出现不同程度的增加。

表 3 施氮量对糯和非糯小麦淀粉 RVA 谱特征参数的影响

Table 3 Effect of nitrogen application rate on RVA characteristic parameters of waxy and no-waxy wheat starch

年份 Year	品种 Variety	施氮量 Nitrogen application rate	RVA 谱特征参数 RVA profile characteristics						
			峰值黏度 Peak viscosity	低谷黏度 Low valley viscosity	稀懈值 Breakdown value	最终黏度 Final viscosity	回生值 Setback value	峰值时间 Peak time	糊化温度 Pasting temperature
2019	M902	N ₀	2127 c	1515 c	646 b	2818 c	1312 c	5.95 ab	87.5 ab
		N ₄₅	2312 ab	1676 a	636 b	3031 a	1413 a	6.11 a	88.5 a
		N ₉₀	2312 ab	1538 bc	774 a	2835 c	1297 c	6.05 ab	87.9 ab
		N ₁₃₅	2346 a	1581 b	765 a	2913 b	1366 b	6.00 ab	88.0 ab
		N ₁₈₀	2359 a	1560 bc	799 a	2975 ab	1415 a	5.95 ab	88.0 ab
		N ₂₂₅	2231 b	1428 d	817 a	2700 d	1277 c	5.87 b	87.2 b
		平均 Mean	2281	1550	739	2879	1347	5.99	87.9
	Z168	N ₀	1357 d	449 d	951 c	627 d	175 b	3.42 b	68.6 a
		N ₄₅	1386 d	497 d	946 c	676 d	179 b	3.67 a	67.0 b
		N ₉₀	1875 b	803 b	1052 ab	1099 b	297 a	3.75 a	67.1 b
		N ₁₃₅	2005 a	927 a	1078 ab	1219 a	292 a	3.85 a	66.9 b
		N ₁₈₀	1746 c	720 c	1026 b	985 c	287 a	3.73 a	66.9 b
		N ₂₂₅	1887 b	795 b	1092 a	1086 b	290 a	3.78 a	66.8 b
		平均 Mean	1709	699	1024	949	254	3.70	67.2
	F-value	小麦品种 V	273.34**	1374.23**	1532.09**	50227.06**	13484.20**	3843.87**	3264.82**
		施氮量 N	51.07**	48.75**	21.29**	62.63**	12.14**	3.55*	1.21
		V×N	27.44**	75.43**	1.17	98.23**	18.94**	3.50*	2.49
2020	M902	N ₀	2138 abc	1645 a	544 b	2696 a	1135 bc	6.07 a	88.5 a
		N ₄₅	2130 abc	1534 ab	543 b	2704 a	1168 abc	5.91 ab	88.0 a
		N ₉₀	2252 ab	1343 c	630 ab	2432 b	1118 c	5.78 b	86.4 b
		N ₁₃₅	2315 a	1372 bc	609 ab	2484 b	1200 ab	5.91 ab	88.1 a
		N ₁₈₀	2004 c	1217 c	685 a	2078 c	1119 c	5.84 b	87.8 a
		N ₂₂₅	2058 bc	1324 c	644 a	2449 b	1221 a	5.93 ab	88.7 a
		平均 Mean	2150	1406	609	2474	1160	5.91	87.9
	Z168	N ₀	1487 c	521 b	1017 b	629 d	288 bc	3.60 a	66.9 a
		N ₄₅	1637 bc	709 a	897 c	1004 bc	295 bc	3.67 a	67.2 a
		N ₉₀	1706 ab	678 ab	612 d	936 c	284 c	3.40 b	66.8 a
		N ₁₃₅	1847 a	789 a	1105 ab	1154 ab	339 abc	3.64 a	66.9 a
		N ₁₈₀	1833 ab	779 a	1112 a	1220 a	413 a	3.62 a	66.6 a
		N ₂₂₅	1746 ab	829 a	1032 ab	1215 a	363 ab	3.64 a	66.9 a
		平均 Mean	1709	717	962	1026	331	3.60	66.9
	F-value	小麦品种 V	490.99**	1040.41**	68.72*	1904.97**	826.34**	5139.77**	47,656.07**
		施氮量 N	3.77*	1.35	22.17**	5.96**	3.65*	3.35*	3.40*
		V×N	3.32*	9.62**	19.16**	28.59**	2.70	1.04	2.91*

表中缩写和处理同表 2。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

Abbreviations and treatments in the table are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters following data within same column of same variety mean significant differences among treatments at $P < 0.05$. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

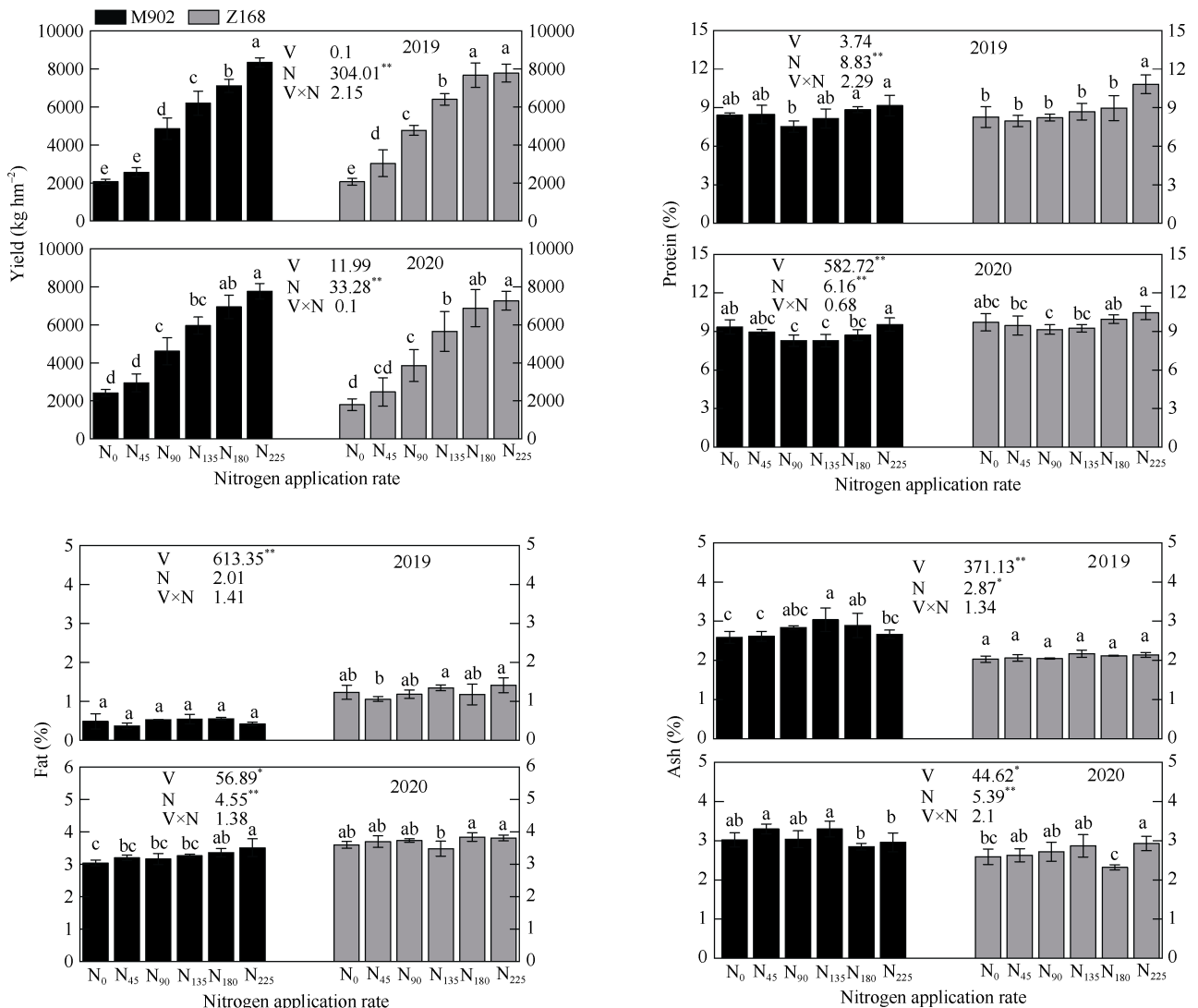
随施氮量增加, 两小麦品种的峰值黏度、低谷黏度、稀糊值、最终黏度和回生值均先升后降, 其中绵麦 902 的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、回生值在达 N_{180} 处理后显著下降, 与 N_{225} 处理差异显著(2020 年则在达 N_{135} 后显著下降, 与 N_{180} 处理差异显著); 中科紫糯麦 168 的峰值黏度、低谷黏度、稀糊值、最终黏度则在达 N_{135} 处理后显著下降, 与 N_{180} 、 N_{225} 处理差异显著(2020 年峰值黏度、低谷黏度、峰值时间、糊化温度在达 N_{135} 后有所下降, 与 N_{180} 处理差异不显著)。

2.3 施氮量对糯和非糯小麦产量、其他原粮品质的影响

从图 2 可知, 两年度绵麦 902 产量略高于中科紫糯麦 168, 主要在于绵麦 902 穗粒数和千粒重相对

更高。施氮量极显著影响小麦产量, 两品种的有效穗、穗粒数、产量均随施氮量增加而增加, 在 N_{225} 达最大值, 千粒重则先升后降, 在 N_{45} 值较大。

脂肪、灰分、粉质率、硬度指数和容重受品种因素影响达显著或极显著, 施氮量虽然也有影响, 但不如品种因素对其影响显著。品种 $\times$ 施氮量的交互效应因年际不同在粉质率、硬度指数、容重上存在显著性差异。绵麦 902 的粉质率和灰分含量高, 中科紫糯麦 168 的蛋白质和脂肪含量高、硬度和容重高。相比 2019 年, 2020 年绵麦 902 和中科紫糯麦 168 的蛋白质、脂肪、灰分、粉质率均有所上升, 其中绵麦 902 的脂肪含量和中科紫糯麦 168 的粉质率上升得最多, 分别增加了 578.13%和 2958.82%, 硬度指数则分别下降了 3.18%和 3.99%。



(图 2)

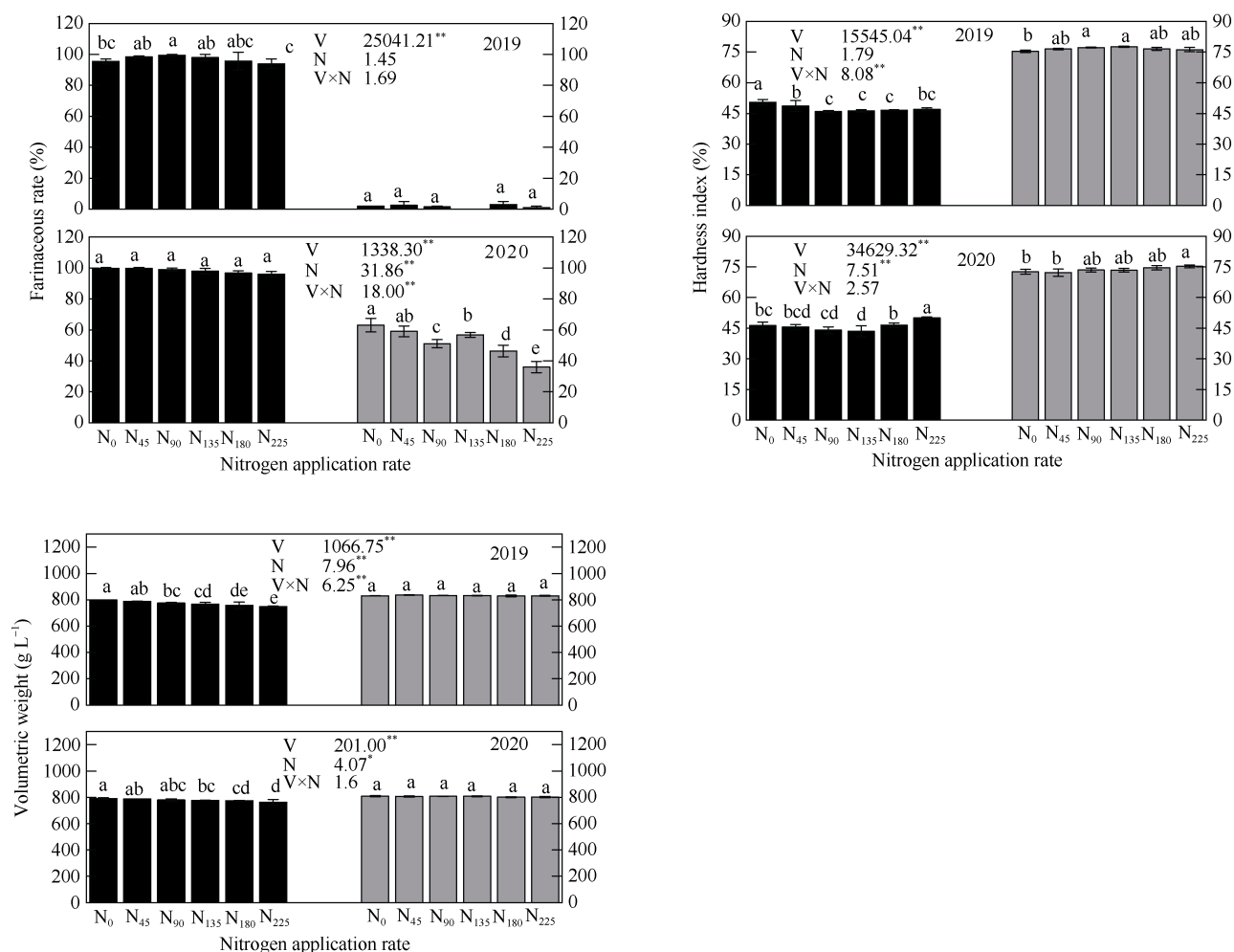


图 2 施氮量对糯和非糯小麦产量、其他原粮品质的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen application rate on quality of waxy and no-waxy wheat yield and other raw grains

图中缩写和处理同表 2。相同品种图柱上不同小写字母表示不同施氮水平间有显著差异 ($P < 0.05$); * 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Abbreviations and treatments in the diagram are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters on the same variety column indicated that there were significant differences among different nitrogen levels at $P < 0.05$. * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

随施氮量增加, 两品种小麦的蛋白质含量均先降后升, 在 N_{225} 达最大值; 灰分超过 N_{135} 处理后有降低的趋势, 中科紫糯麦 168 各处理间差异不显著 (2020 年 N_{180} 、 N_{225} 除外); 粉质率随施氮量增加有降低的趋势; 硬度指数有升高的趋势, 但 N_{90} 和 N_{135} 处理间两品种的硬度指数差异不显著。绵麦 902 的脂肪含量 2019 年在 N_{180} 达最大值, 各处理间差异不显著, 2020 年则在 N_{225} 达最大值, 与 N_{135} 、 N_{180} 差异不显著; 中科紫糯麦 168 的脂肪含量 2019 年在 N_{225} 达最大值, 与 N_{135} 处理差异不显著, 2020 年则在 N_{180} 达最大值, 与 N_{90} 处理差异不显著。容重随施氮量增加而降低, 中科紫糯麦 168 各处理间差异不显著。

2.4 施氮量对糯和非糯小麦出酒率、总酸、总酯及杂醇油含量的影响

由图 3 可知, 出酒率和杂醇油含量主要受品种因素的影响, 总酸、总酯含量主要受施氮量的影响。品种×施氮量的交互效应在出酒率、总酸、总酯、杂醇油达显著或极显著。中科紫糯麦 168 的总酸、总酯、杂醇油含量均显著高于绵麦 902。2020 年两品种的总酸、总酯含量均有所下降, 绵麦 902 的总酸、总酯含量分别下降了 32.36% 和 46.54%, 中科紫糯麦 168 的总酸、总酯含量分别下降了 46.22% 和 50.51%。

2019 年绵麦 902 出酒率高于中科紫糯麦 168, 出酒率随施氮量增加有降低的趋势, 在 N_{90} 和 N_{135} 处理出酒率较高; 2020 年绵麦 902 的出酒率则低于

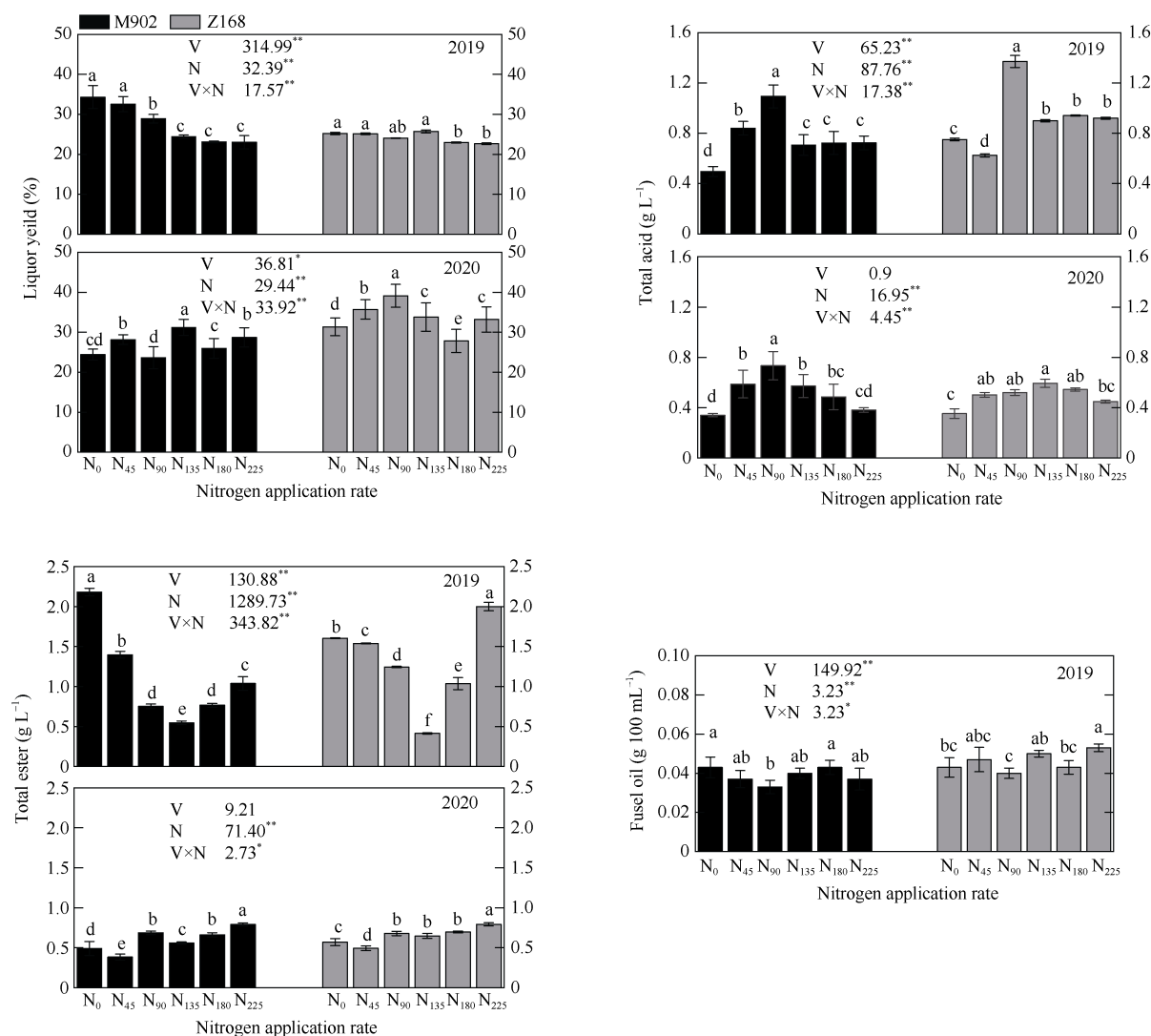


图 3 施氮量对糯和非糯小麦出酒率、总酸、总酯及杂醇油含量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen application rate on yield, total acid, total ester and fusel oil content of waxy and non-waxy wheat

图中缩写和处理同表 2。相同品种图柱上不同小写字母表示不同施氮水平间有显著差异($P < 0.05$); *和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Abbreviations and treatments in the diagram are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters on the same variety column indicated that there were significant differences among different nitrogen levels at $P < 0.05$. * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

中科紫糯麦 168, 与上年度相比下降了 2.53 个百分点, 分别在 N₁₃₅ 和 N₉₀ 出酒率最高。适宜的施氮量会提高总酸含量, 两品种总酸含量均在 N₉₀ 处理下较高 (中科紫糯麦 168 在 2020 年例外, 在 N₁₃₅ 处理下最高)。两年度两品种总酯含量变化规律与总酸相反, 以 N₁₃₅ 处理下含量较低, 与 N₁₈₀ 和 N₂₂₅ 处理差异显著。两品种杂醇油含量均在 N₉₀ 处理下最低, 与 N₁₃₅ 处理差异显著。

2.5 施氮量对糯和非糯小麦挥发性风味物质的影响

由图 4 可知, 检测出的挥发性风味物质主要为

酸、酯、醇、醛、酮五类物质, 按具体组分数量排序依次为: 酯类 > 醇类 > 醛类 > 酮类 > 酸类。中科紫糯麦 168 的挥发性风味物质数量高于绵麦 902, 主要是因为每一类组分数量均高于绵麦 902。绵麦 902 的风味物质数量在 N₉₀ 处理最高, 其次为 N₂₂₅ 处理, 中科紫糯麦 168 的风味物质数量在 N₂₂₅ 处理最高, 其次为 N₁₃₅ 处理; 就酸类、酯类、醇类、醛类、酮类物质数量而言, 两品种小麦在 N₉₀~N₁₃₅ 处理较高。研究发现, 两小麦酯类代表成分有较大不同 (表 4), 绵麦 902 主要为 9-十六酸乙酯、十四酸乙酯、乙酸 2-苯基乙酯等, 中科紫糯麦 168 主要为

(Z, Z, Z)-9,12,15-十八碳三烯酸乙酯、十八酸乙酯、正癸酸异丁酯等，其他风味物质成分如醇、酸、酮、醛则大同小异。

2.6 糯和非糯小麦挥发性风味物质的 PCA 分析和综合评价

由表 5 所示, 2 个品种均提取了特征值大于 1 的 5 个成分, 将提取的载荷平方和进行旋转后, 绵麦 902 所得到的前 3 个成分的特征值分别是 19.4、13.2、5.8 (中科紫糯麦 168 分别为 23.7、19.4、12.7), 前 3 个成分累计方差百分比为 83.702% (中科紫糯麦 168 为 75.374%)。即表明前 3 个主成分已经包含了绵麦 902 和 中科紫糯麦 168 白酒挥发性风味物质成分的绝大部分信息。根据主成分评价得分模型将各施氮量处理的白酒挥发性风味物质含量进行综合评分 (表 6)可知, 绵麦 902 综合排名第 1 位的是 N₉₀ 处理, 其次为 N₂₂₅、N₁₈₀ 处理, 中科紫糯麦 168 综合排名第一位的是 N₂₂₅ 处理, 其次是 N₁₃₅、N₉₀ 处理, 说

明在这些处理下有利于风味物质的生成, 所含风味物质的数量和含量较多。

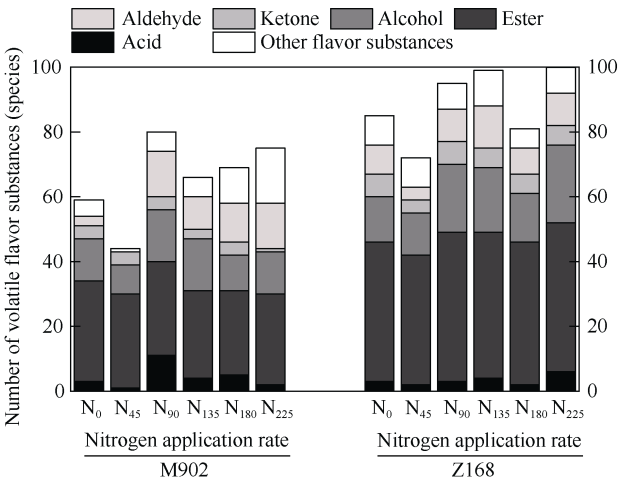


图 4 施氮量对糯和非糯小麦挥发性风味物质的影响
Fig. 4 Effect of nitrogen application rate on volatile flavor compounds of waxy and no-waxy wheat

表 4 白酒主要挥发性风味物质组分及旋转后因子载荷系数
Table 4 Main volatile flavor components and post-rotation factor loading coefficient of liquor

挥发性风味物质种类 Types of volatile flavor compounds		M902		旋转后因子载荷系数 Factor load coefficient after rotation	Z168		旋转后因子载荷系数 Factor load coefficient after rotation
酯类 Ester	9-十六酸乙酯 Ethyl-9-hexadecanoate			0.980	(Z, Z, Z)-9,12,15-十八碳三烯酸乙酯 (Z, Z, Z)-9,12,15-octadecatrienoic acid ethyl ester		0.961
	十四酸乙酯(肉豆蔻酸乙酯) Ethyl myristate (ethyl myristate)			0.964	十八酸乙酯 Ethyl octadecanoate		0.949
	乙酸 2-苯基乙酯 2-phenylethyl acetate			0.946	正癸酸异丁酯 Isobutyl decanoate		0.941
	(Z)-十五碳-9-烯酸乙酯 (Z)-ethyl pentadec-9-enoate			0.923	(E)-9-十八烯酸乙酯 Ethyl(E)-9-octadecenoate		0.928
	癸二酸乙酯 Ethyl sebacate			0.920	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate		0.892
	月桂酸异丁酯 Isobutyl laurate			0.914	油酸乙酯 Ethyl oleate		0.875
	十五烷酸乙酯 Ethyl pentadecanoate			0.909	十四酸苯乙酯 Phenethyl myristate		0.875
	十六酸乙酯(棕榈酸乙酯) Ethyl hexadecanoate (ethyl palmitate)			-0.887	9,12-十六二烯酸乙酯 Ethyl-9,12-hexadecadienoate		0.843
	(E)-9-十八烯酸乙酯 Ethyl-9-octadecenoate			0.865	十七酸乙酯 Ethyl heptadecanoate		0.819
	十五酸 3-甲基丁酯 3-methylbutyl pentadecanoate			0.739	亚油酸乙酯 Ethyl linoleate		-0.799

(续表 4)

挥发性风味物质种类 Types of volatile flavor compounds		M902	旋转后因子 载荷系数 Factor load coefficient after rotation	Z168	旋转后因子 载荷系数 Factor load coefficient after rotation
醇类 Alcohols	癸醇 Decyl alcohol		0.950	(E)-3,7,11-三甲基-1,6,10-十二碳三烯-3-醇 (E)-3,7,11-trimethyl-1,6,10-dodecatrien-3-ol	0.837
	十四醇 Tetradecyl alcohol		0.894	癸醇 Decyl alcohol	0.740
	十六醇 Ethal		0.786	十六醇 Ethal	0.734
	苯乙醇 Phenylethyl alcohol		0.709	三聚糖-2-醇 Trisaccharide-2-ol	0.715
	2-(2-乙氧基)-乙醇 2-(2-ethoxy)-ethanol		-0.637	乙酸正十六醇 Hexadecanol acetate	0.687
	1-丁醇 1-butanol		-0.449	1-辛醇 1-octanol	0.549
	2-甲基-3-丁烯-1-醇 2-ethyl-3-butene-1-ol		-0.426	正己醇 N-hexanol	0.465
	二甲基-硅丙二醇 Dimethyl-silicon propylene glycol		-0.358	十四醇 Tetradecyl alcohol	0.381
	1-辛醇 1-octanol		-0.350	3-甲基-1-丁醇 5-methyl-1-butanol	0.323
	酸类 Acid		0.351	辛酸 Caprylic acid	0.640
酮类 Ketone	乙酸 Acetic acid			正十六酸 N-hexadecanoic	-0.586
				乙酸 Acetic acid	0.313
	2-十五酮 2-pentadecanone		0.951	6,10,14-三甲基-2-十五酮 6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone	0.957
	2-十七烷酮 2-methylmercuric iodide pentadecyl ketone		0.926	2-十七烷酮 2-methylmercuric iodide pentadecyl ketone	0.914
	6,10,14-三甲基-2-十五酮 6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone		0.917	2-十五酮 2-pentadecanone	0.876
				十三酮 Triacontenone	0.496
醛类 Aldehydes	糠醛 Furfural		0.952	苯甲醛 Benzaldehyde	-0.979
	(E,E)-2,4-癸二烯醛 (E,E)-2,4-decadienal		0.899	(E)-2-庚醛 (E)-2-heptaldehyde	0.506
	壬醛 Nonanal		0.508	(E,E)-2,4-癸二烯醛 (E,E)-2,4-decadienal	0.372

表 5 主成分因子分析特征值与旋转载荷平方和
Table 5 Principal component factor analysis eigenvalue and rotation load square sum

基因型 Genotype	成分 Component	总方差解释 Total variance explanation								
		初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extraction of square sum of loads			旋转载荷平方和 Square sum of rotation load		
		总计 Total	方差 Variance	累积 Cumulative	总计 Total	方差 Variance	累积 Cumulative	总计 Total	方差 Variance	累积 Cumulative
			(%)	(%)		(%)	(%)		(%)	(%)
M902	1	20.0	43.5	43.5	20.0	43.5	43.5	19.4	42.2	42.2
	2	14.2	31.0	74.5	14.2	31.0	74.5	13.2	28.8	71.0
	3	5.5	12.0	86.4	5.5	12.0	86.4	5.8	12.7	83.7
	4	4.6	10.1	96.5	4.6	10.1	96.5	5.6	12.1	95.8
	5	1.6	3.5	100.0	1.6	3.5	100.0	1.9	4.2	100.0
Z168	1	33.9	45.9	45.9	33.9	45.9	45.9	23.7	32.1	32.1
	2	16.3	22.0	67.9	16.3	22.0	67.9	19.4	26.2	58.2
	3	10.7	14.5	82.4	10.7	14.5	82.4	12.7	17.2	75.4
	4	6.9	9.4	91.7	6.9	9.4	91.7	10.8	14.6	90.0
	5	6.1	8.3	100.0	6.1	8.3	100.0	7.4	10.0	100.0

表 6 挥发性风味物质主成分得分和综合得分
Table 6 Principal component score and comprehensive score of volatile flavor compounds

样品编号 Sample number	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
902N ₉₀	1.87	-0.27	0.62	0.02	-0.45	0.78	1
902N ₂₂₅	-0.08	1.61	-0.80	-0.73	-0.62	0.21	2
902N ₁₈₀	-0.23	0.15	-0.53	1.94	0.18	0.12	3
902N ₁₃₅	-0.85	0.42	1.75	-0.13	0.45	-0.01	4
902N ₀	0.12	-0.58	-0.75	-0.73	1.65	-0.23	5
902N ₄₅	-0.83	-1.34	-0.28	-0.39	-1.21	-0.87	6
168N ₂₂₅	1.31	0.09	1.30	0.81	-0.30	0.76	1
168N ₁₃₅	-0.95	1.36	0.47	-0.01	1.10	0.24	2
168N ₉₀	1.02	0.62	-1.65	-0.07	0.06	0.20	3
168N ₀	0.19	-0.81	0.40	-1.81	0.23	-0.33	4
168N ₄₅	-0.60	-1.44	-0.43	1.04	0.69	-0.42	5
168N ₁₈₀	-0.97	0.19	-0.10	0.03	-1.78	-0.45	6

表中 N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀、N₂₂₅ 表示施氮量分别为 0、45、90、135、180、225 kg hm⁻²。902: 绵麦 902; 168: 中科紫糯麦 168。
N₀, N₄₅, N₉₀, N₁₃₅, N₁₈₀, and N₂₂₅ in the table indicate that the nitrogen application rates are 0, 45, 90, 135, 180, and 225 kg hm⁻², respectively.
902: Mianmai 902; 168: Zhongkezimuomai 168.

2.7 原粮品质与酿酒品质的相关性分析

相关分析表明(表 7), 总淀粉和支链淀粉与总酸、总酯极显著正相关, 除稀澱值与总酸极显著正相关、与总酯相关性不显著外, 峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、回生值、峰值时间、糊化温度均与出酒率、总酸、总酯负相关。蛋白质与总酸极显著负相关, 脂肪与出酒率极显著正相关, 与总酸、总酯极显著负相关, 灰分、粉质率均与总酸、总酯极显著负相关, 容重与总酸显著正相关, 与总酯极显著正相关。

2.8 淀粉理化指标对总酯含量影响的途径分析

途径分析表明(表 8), 总淀粉、支链淀粉与总酯含量极显著正相关, 直支比对总酯形成的贡献最大, 为 0.527, 其次是总淀粉, 为 0.290; 总淀粉、直链淀粉、支链淀粉、稀澱值、最终黏度、回生值、糊化温度等对总酯的形成具有正向直接途径作用, 但以直链淀粉最大, 其次为糊化温度。另外大多数淀粉理化指标通过直链淀粉、糊化温度在总酯形成过程中起正向间接作用来促进总酯的形成。

表 7 原粮品质、酿酒品质的相关性分析(2019–2020)

Table 7 Correlation analysis of grain quality and wine quality in 2019 and 2020

指标 Index	出酒率 Liquor yield	总酸 Total acid	总酯 Total ester
淀粉 Total starch	-0.112	0.525**	0.442**
直链淀粉 Amylose	-0.192	-0.081	-0.103
支链淀粉 Amylopectin	0.029	0.340**	0.303**
直支比 Amylose/Amylopectin	-0.197	-0.113	-0.144
峰值黏度 Peak viscosity	-0.155	0.150	-0.201
低谷黏度 Low valley viscosity	-0.132	-0.029	-0.149
稀懈值 Breakdown value	-0.132	0.305**	0.164
最终黏度 Final viscosity	-0.124	-0.039	-0.115
回生值 Setback value	-0.123	-0.103	-0.111
峰值时间 Peak time	-0.173	-0.097	-0.117
糊化温度 Pasting temperature	-0.154	-0.137	-0.120
蛋白质 Protein	0.084	-0.367**	-0.046
脂肪 Fat	0.422**	-0.620**	-0.553**
灰分 Ash	0.211	-0.431**	-0.537**
粉质率 Farinaceous rate	0.166	-0.391**	-0.343**
硬度指数 Hardness index	0.126	0.167	0.202
容重 Volumetric weight	0.043	0.267*	0.351**

样本量为两年度 2 个品种 3 个重复。相关系数临界值: $r_{0.05} = 0.232$, $r_{0.01} = 0.302$ 。*和**分别表示在($P < 0.05$)和($P < 0.01$)水平上差异显著。
Sample size indicates three repetitions of two varieties for two years. The critical value of correlation coefficient: $r_{0.05} = 0.232$, $r_{0.01} = 0.302$.

* and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

3 讨论

3.1 小麦淀粉品质主要受环境、品种因素影响, 90~135 kg hm⁻² 施氮量下糯和非糯小麦淀粉含量、组分和糊化特性较好

品种、环境、栽培措施是影响小麦品质的 3 个方面。本试验中, 影响淀粉品质的优先顺序为环境 > 品种 > 施氮量。2020 年同一品种的总淀粉和直链淀粉含量均低于 2019 年, 这可能与该年小麦遭遇极端低温, 灌浆期降雨量较多有关。前人研究也认为灌浆期小麦籽粒遇水, 淀粉发生降解, 淀粉品质会下降^[44-45]。

糯小麦由于基因 *Wx-A1b*、*Wx-B1b* 及 *Wx-D1b* 在个体中同时纯合或缺失导致籽粒不含直链淀粉或直链淀粉含量很低(<2%)^[46-48]。在本试验中, 与绵麦 902 相比, 中科紫糯麦 168 为糯性小麦, 其直链淀粉含量极低, 支链淀粉含量极高, 糊化时间短、糊化温度低, 与张敏等^[28]、潘志芬等^[5]研究基本一致; 除稀懈值外, 其余 RVA 特征参数均低于绵麦 902。糯麦 *Waxy* 基因缺失后, 淀粉的种类和颗粒大小与非糯麦相比有较大不同, 蛋白质结构及基质间可能形成复合物,

进而对淀粉的糊化特性、吸水率产生影响^[5,49-50]。

施氮量会影响小麦淀粉组分和糊化特性, 但不同筋力型小麦研究结果不同, 不同区域的研究结果也有不同。如姜东等^[45]认为, 适量施氮能有效提高中筋品种小麦籽粒中直链淀粉和支链淀粉的含量; 而蔡瑞国等^[19]发现, 适量施氮能提高强筋和弱筋小麦籽粒中的支链淀粉含量, 降低直链淀粉含量。马冬云等^[29]认为随施氮水平增加, 总淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度总体呈增加趋势, 增施氮肥有利于改善小麦淀粉糊化特性。王公卿等^[18]认为随施氮量增加, 淀粉峰值黏度、低谷黏度、终结黏度、稀懈值呈逐渐增大趋势, 但追氮量过大也将导致淀粉特性变劣。可见, 施氮量对淀粉组分和糊化特性的影响存在区域差异。

同时, 施氮量对淀粉组成、糊化特性的影响在糯和非糯小麦上又有区别。张敏等^[28]研究发现在 0~300 kg hm⁻² 施氮范围内, 非糯小麦籽粒直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量均随施氮量增加先降后升; 糯小麦的直链、支链和总淀粉含量则先升后降, 增施氮肥能显著提高小麦籽粒淀粉的峰值黏度和低谷黏度。在本试验中, 施氮量显著影响糯和非糯小

表 8 淀粉理化指标对总酯含量影响的通径分析(2019–2020)
Table 8 Path analysis of the effect of starch physicochemical indexes on the total ester content in 2019 and 2020

淀粉理化指标 Physicochemical indexes of starch	与总酯的相关系数 Correlation coefficient with total esters	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect							贡献率 Contribution rate				
			A1→C	A2→C	A3→C	A4→C	B1→C	B2→C	B3→C		B4→C	B5→C	B6→C	B7→C
A1	0.442**	0.657		-2.726	0.229	2.956	0.253	0.499	0.024	-0.494	-0.359	0.167	-0.680	0.290
A2	-0.103	3.515	-0.510		-0.224	-3.653	-0.341	-0.640	-0.030	0.633	0.445	-0.211	0.832	-0.352
A3	0.303**	0.241	0.625	-3.277		3.476	0.311	0.598	0.026	-0.591	-0.423	0.199	-0.796	0.073
A4	-0.144	-3.663	-0.530	3.505	-0.228		-0.338	-0.633	-0.030	0.627	0.443	-0.211	0.832	0.527
B1	-0.201	-0.412	-0.400	2.906	-0.182	-3.004		-0.633	-0.020	0.594	0.390	-0.181	0.680	0.083
B2	-0.149	-0.692	-0.470	3.248	-0.208	-3.352	-0.377		-0.020	0.648	0.432	-0.203	0.781	0.103
B3	0.164	0.033	0.482	-2.654	0.190	2.789	0.213	0.486		-0.468	-0.331	0.163	-0.673	0.005
B4	-0.115	0.660	-0.490	3.370	-0.216	-3.480	-0.371	-0.680	-0.020		0.446	-0.208	0.805	-0.076
B5	-0.111	0.455	-0.520	3.444	-0.224	-3.569	-0.353	-0.658	-0.020	0.648		-0.210	0.825	-0.051
B6	-0.117	-0.215	-0.510	3.463	-0.223	-3.597	-0.348	-0.655	-0.030	0.638	0.446		0.836	0.025
B7	-0.120	0.843	-0.530	3.472	-0.227	-3.617	-0.332	-0.641	-0.030	0.630	0.445	-0.213		-0.101

A1、A2、A3、A4 分别代表总淀粉、直链淀粉、支链淀粉、直支比; B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7 分别代表峰值黏度、低谷黏度、稀薄值、最终黏度、回生值、峰值时间、糊化温度; C 代表总酯。*和**分别表示在($P < 0.05$)和($P < 0.01$)水平上差异显著。

A1, A2, A3, and A4 represents starch, amylose, amylopectin, and amylose-branch ratio, respectively. B1, B2, B3, B4, B5, B6, and B7 represent peak viscosity, low valley viscosity, breakdown value, final viscosity, setback value, peak time, and pasting temperature, respectively. C: the total ester. * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

麦直链淀粉含量、直支比和 RVA 谱特征参数值。两年度两品种的总淀粉和支链淀粉含量在 90~135 kg hm⁻² 内较高, 超过 135 kg hm⁻² 后出现下降的趋势。糯和非糯小麦的峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度和回生值随施氮量增加均先升后降, 但峰值黏度、低谷黏度在达 135 kg hm⁻² 后开始下降, 淀粉特性变劣, 与张敏等^[28]、马冬云等^[29]结果不一致, 王公卿等^[18]研究结论一致。也反映出施氮量对糯和非糯小麦淀粉含量、组分、糊化特性的影响存在区域差异。本文研究结果表明糯和非糯小麦淀粉含量、组分和糊化特性较好的施氮量范围集中在 90~135 kg hm⁻²。

3.2 小麦出酒率受环境、粉质率影响, 淀粉含量、组分、糊化特性对总酸、总酯的形成具有重要影响

酿酒主要是将粮食中的淀粉经过发酵产生酒精的过程。酸类物质是重要的协调成分或调和成分, 酯类物质是香气的主体成分, 醇类物质是白酒风味中醇甜和助香的来源^[12-13]。就酿酒品质而言, 原粮的出酒率、总酸、总酯、杂醇油含量是相对重要的指标^[2,6,43], 而这些指标与淀粉的含量及组分、糊化特性等存在密切联系^[2,5]。

前人研究表明小麦籽粒淀粉含量及组分会影响到出酒率, 原料中支链淀粉含量高、直支比低, 泡粮吸水速度快, 糖化温度高的小麦(如糯小麦), 出酒率、总酸、总酯含量要高于普通小麦, 可以改善白酒品质^[2,6-7]。在本试验中, 就出酒率而言, 2019 年绵麦 902 显著高于中科紫糯麦 168, 2020 年则相反, 中科紫糯麦 168 的出酒率有较大提升。2020 年中科紫糯麦 168 的粉质率较 2019 年增幅较大, 硬度指数则下降了 3.99%, 推测粉质率的提升与该年度灌浆期雨水较多有关。前人研究认为粉质率升高后, 小麦玻璃质含量降低, 结构变得松散, 促进淀粉吸水、糊化, 提高白酒酿制过程淀粉颗粒与酿酒介质的接触面积, 有利于酿酒产量稳定^[40]。因而, 本研究认为, 相比淀粉含量和组分, 年际不同和粉质率的高低对出酒率的影响更大。

总酸、总酯、杂醇油也是酿酒品质的重要指标。有研究表明总酸与白酒香气强度、香气协调性正相关性最强, 其次是总酯; 总酸含量越多, 总酯越多, 香气越好, 滋味与典型性亦越好, 白酒的总体质量越好^[51]。也有研究表明淀粉糖化温度高, 可促进发酵体系中微生物、酶的种类和数量的变化, 有利于

产生更多的酸类物质^[6]; 淀粉含量高, 较易水解为还原糖, 在发酵开始时还原糖含量和利用速率比普通小麦高, 对后续的发酵有利, 也有利于生成更多酯类物质^[7]; 适宜的杂醇油含量及各种风味物质之间的恰当比例则可使酒体丰满圆润、口感柔和协调、味道独特^[52-53], 过高的杂醇油则会影响酒的口感, 导致产品辛辣苦涩, 对人体神经系统有刺激和麻醉作用^[54]。高蛋白质含量易使杂醇含量偏高, 淀粉在糖化时多糖水解速度快且糖积累大, 从而导致酮酸生成速度较快, 生成量较多^[6]。

本试验中, 绵麦 902 所酿制的白酒具有杂醇油含量低的优点, 但总酸、总酯含量不高; 中科紫糯麦 168 所酿白酒具有总酸、总酯更高的特点, 杂醇含量稍多一些, 但在安全范围(≤ 0.2 g 100 mL⁻¹), 整体酿酒特性要优于绵麦 902。但 2020 年两品种总酸、总酯含量较 2019 年有显著降低。相关性分析表明总淀粉含量和支链淀粉含量与总酸、总酯含量呈极显著正相关关系, 2020 年两品种小麦总酸、总酯含量的下降可能与总淀粉、支链淀粉含量下降有关。通径分析也表明淀粉的含量和组分对总酸、总酯的形成具有重要影响, 大多数淀粉理化指标通过直链淀粉、糊化温度等在总酯形成过程中起正向间接作用。

另外, 就施氮量而言, 本试验条件下两年度 2 个品种总酸含量在 90 kg hm⁻² 下较高, 随施氮量增加先升后降, 总酯含量在 135 kg hm⁻² 下相对较低, 变化规律与总酸相反, 这可能与不同施氮量下白酒酒精度不同, 导致酒中酸、酯类物质出现“酸增酯减”的变化规律有关^[55]。

3.3 酯类物质是挥发性风味物质主要成分, 受品种因素影响较大, 适宜施氮量可提升白酒风味

白酒中挥发性风味物质主要来源于发酵过程中酿酒原料间发生的“美拉德反应”^[56], 即氨基化合物和还原糖化合物之间发生反应。酯类是具有芳香的化合物, 主要呈现出花香和果香, 在构成各白酒典型性中起着关键作用^[57], 其种类和含量是白酒中最丰富的一类家族。本试验中, 中科紫糯麦 168 的挥发性风味物质总数量和酸、酯、醇、醛、酮五类物质均高于绵麦 902。同时, 两品种所酿制白酒酯类物质占比最多、含量较高, 与前人关于酯类风味物质的研究结论一致^[32-33]。但两品种小麦酯类代表成分有较大不同, 绵麦 902 的十六酸乙酯(棕榈酸乙酯)含量较高, 中科紫糯麦 168 的油酸乙酯和亚油酸乙酯含量较高。研究认为三大高级脂肪酸(油酸、亚油酸、

棕榈酸)及其乙酯的存在会导致酒体浑浊^[52], 实际生产中要注意控制酒中三大高级脂肪酸及其乙酯含量。相比而言, 中科紫糯麦168酯类物质多, 三大不利脂肪酸少, 酿酒风味更佳。

PCA 分析采用降维思想, 将原来众多变量通过降维、降噪转化为几个综合指标用于反应原来变量的信息, 常用于白酒挥发性风味成分的评价^[58-59]。本试验中, PCA 分析表明, 绵麦 902 综合排名第1位的是 90 kg hm⁻² 处理, 其次为 225 kg hm⁻²、180 kg hm⁻² 处理, 中科紫糯麦 168 综合排名第1位的是 225 kg hm⁻² 处理, 其次是 135 kg hm⁻²、90 kg hm⁻² 处理, 说明在这些施氮处理下有利于白酒风味物质的生成, 所含风味物质的数量和含量较多。不同施氮量下糯麦和非糯麦的总酸、总酯含量与风味物质的规律存在差异, 可能是由于施氮量影响了小麦的淀粉含量及组分、糊化特性, 在蒸煮、发酵过程中, 风味物质的形成又受多方面因素综合影响, 原料中基本组分及非基本组分在各类生物酶的直接或间接催化下进行生物合成、发生非酶促化学反应和热降解反应所引起的^[33]。

4 结论

综合来看, 通过降低施氮量(≤ 135 kg hm⁻²)可以提高糯和非糯小麦的淀粉含量, 改善淀粉直支比和糊化特性, 选用总淀粉和支链淀粉含量高的小麦品种或充分利用糯小麦优良的酿酒特性和普通弱筋小麦合理搭配用于酿酒, 有利于改善淀粉品质, 提高出酒率、协调总酸、总酯、挥发性风味物质的含量, 降低杂醇油含量, 改善白酒品质。在 90~135 kg hm⁻² 施氮范围内, 绵麦 902 和 中科紫糯麦 168 的蛋白质等氨基化合物含量可能较适宜, 总淀粉、支链淀粉含量较高, 淀粉易糊化, 所需糊化温度更低、时间更短, 所酿白酒出酒率和总酸含量较高, 杂醇油含量较低, 有利于产生更多挥发性风味物质, 是适宜酿酒的施氮量。

References

- [1] 石谢新. 四川多项重磅措施推动白酒产业高质量发展. 中国食品工业, 2021, (11): 88-91.
Shi X X. Several measures to promote high quality development of liquor industry in Sichuan. *China's Food Ind*, 2021, (11): 88-91 (in Chinese with English abstract).
- [2] 曹新莉. 原料与酿酒. 酿酒科技, 2002, (4): 53-54.
Cao X L. Raw materials and brewing. *Liquor-making Sci Technol*, 2002, (4): 53-54 (in Chinese with English abstract).
- [3] 信春晖, 邵先军, 胥伟宏, 许玲, 董乔娟. 酿酒原料对白酒风

味的影响. 酿酒科技, 2013, (7): 68-74.

- Xin C H, Shao X J, Xu W H, Xu L, Dong Q J. Effect of raw materials on liquor flavor. *Liquor-making Sci Technol*, 2013, (7): 68-74 (in Chinese with English abstract).
- [4] 信春晖. 小麦蛋白质在酿酒中的功用. 酿酒科技, 2005, (12): 51-53.
Xin C H. Function of wheat protein in brewing. *Liquor-making Sci Technol*, 2005, (12): 51-53 (in Chinese with English abstract).
- [5] 潘志芬, 邹弈星, 王春萍, 邓光兵, 龙海, 余懋群. 糯小麦与酿酒谷物黏度特性的比较. 麦类作物学报, 2011, 31: 870-874.
Pan Z F, Zou Y X, Wang C P, Deng G B, Long H, Yu M Q. Comparison of viscosity characteristics between waxy wheat and brewed grain. *J Triticeae Crops*, 2011, 31: 870-874 (in Chinese with English abstract).
- [6] 赵国君, 徐智斌, 冯波, 王迅, 兰秋霞, 项超, 黄田钊, 王涛. 糯小麦的酿酒特性研究. 中国农业科学, 2013, 46: 1127-1135.
Zhao G J, Xu Z B, Feng B, Wang X, Lan Q X, Xiang C, Huang T F, Wang T. Study on brewing characteristics of waxy wheat. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 1127-1135 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李斌, 徐智斌, 冯波, 王涛. 糯小麦与普通小麦的固态发酵特性比较. 麦类作物学报, 2012, 32: 949-954.
Li B, Xu Z B, Feng B, Wang T. Comparison of solid-state fermentation characteristics between waxy wheat and common wheat. *J Triticeae Crops*, 2012, 32: 949-954 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李斌, 徐智斌, 冯波, 王涛. 糯小麦与普通小麦糖化过程的比较. 中国农业科学, 2011, 44: 2760-2767.
Li B, Xu Z B, Feng B, Wang T. Comparison of saccharification process between waxy wheat and common wheat. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 2760-2767 (in Chinese with English abstract).
- [9] 赵国君, 李斌, 徐智斌, 冯波, 王涛. 添加糯小麦对普通小麦和粳高粱小曲酒酿造特性的影响. 麦类作物学报, 2013, 33: 942-945.
Zhao G J, Li B, Xu Z B, Feng B, Wang T. Effects of waxy wheat addition on the brewing characteristics of common wheat and japonica sorghum. *J Triticeae Crops*, 2013, 33: 942-945 (in Chinese with English abstract).
- [10] Nakamura T, Yamamori M, Hirano H. Production of waxy (amylose-free) wheats. *Mol Gener Genet*, 1995, 248: 253-259.
- [11] 仲婧宇, 陈智生. 毛细管柱气相色谱法同时测定白酒中的醇、酯. 化学分析计量, 2008, (3): 42-44.
Zhong J Y, Chen Z S. Simultaneous determination of alcohol and ester in liquor by capillary column gas chromatography. *Measur Chem Anal*, 2008, (3): 42-44 (in Chinese with English abstract).
- [12] Fan W, Qian M C. Characterization of aroma compounds of Chinese Wuliangye and Jiannanchun liquors by aroma extract dilution analysis. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 2695-2704.
- [13] Fan W, Qian M C. Identification of aroma compounds in Chinese Yanghe Daqu liquor by normal phase chromatography fractionation followed by gas chromatography olfactometry. *Flav Fragr J*, 2006, 21: 333-342.
- [14] Pino J A. Characterization of rum using solid-phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry. *Food Chem*, 2007, 104: 421-428.
- [15] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《地理标志

- 产品 五粮液酒》. GB/T 22211-2008, 2008.
Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Wuliangye Liquor, A Geographical Indication Product'. GB/T 22211-2008, 2008 (in Chinese).
- [16] 贵州省质量技术监督局. 贵州省地方标准. 《贵州省酱香型白酒酿酒用小麦技术标准》. DB 52/T 868-2014, 2014.
Supervising Department of Quality and Technology of Guizhou Province. Local Standard of Guizhou Province. Technical Standard of Wheat for Soy Flavor Liquor Brewing in Guizhou Province. DB 52/T 868-2014, 2014 (in Chinese).
- [17] 王金凤, 王壮壮, 谷丰序, 牟海萌, 王宇, 段剑钊, 冯伟, 王永华, 郭天财. 氮密调控对两个冬小麦品种碳氮代谢及产量的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 4070–4083.
Wang J F, Wang Z Z, Gu F X, Mou H M, Wang Y, Duan J Z, Feng W, Wang Y H, Guo T C. Effects of nitrogen density regulation on carbon and nitrogen metabolism and yield of two winter wheat varieties. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 4070–4083 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王公卿, 郑志松, 李萌. 氮素对小麦生长发育、产量和品质形成的影响. 河南农业, 2017, (16): 48–49.
Wang G Q, Zheng Z S, Li M. Effects of nitrogen on growth, yield and quality formation of wheat. *Agric Henan*, 2017, (16): 48–49 (in Chinese with English abstract).
- [19] 蔡瑞国, 尹燕桦, 张敏, 戴忠民, 严美玲, 付国占, 贺明荣, 王振林. 氮素水平对冀城 8901 和山农 1391 籽粒品质的调控效应. 作物学报, 2007, 33: 304–310.
Cai R G, Yin Y P, Zhang M, Dai Z M, Yan M L, Fu G Z, He M R, Wang Z L. Regulation effect of nitrogen level on grain quality of Gaocheng 8901 and Shannong 1391. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 304–310 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李金才, 魏凤珍. 氮素营养对小麦产量和籽粒蛋白质及组分含量的影响. 中国粮油学报, 2001, (2): 6–8.
Li J C, Wei F Z. Effects of nitrogen nutrition on wheat yield and grain protein and component content. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2001, (2): 6–8 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘朋召, 周栋, 郭星宇, 于琦, 张元红, 李昊昱, 张琦, 王旭敏, 王小利, 王瑞, 李军. 不同降雨年型旱地冬小麦水分利用及产量对施氮量的响应. 中国农业科学, 2021, 54: 3065–3076.
Liu P Z, Zhou D, Guo X Y, Yu Q, Zhang Y H, Li H Y, Zhang Q, Wang X M, Wang X L, Wang R, Li J. Responses of water use and yield of winter wheat in dryland of different rainfall years to nitrogen application rate. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 3065–3076 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈晓光, 石玉华, 王成雨, 尹燕桦, 宁堂原, 史春余, 李勇, 王振林. 氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系. 中国农业科学, 2011, 44: 3529–3536.
Chen X G, Shi Y H, Wang C Y, Yin Y P, Ning T Y, Shi C Y, Li Y, Wang Z L. Effects of nitrogen fertilizer and paclobutrazol on lignin synthesis and lodging resistance of wheat stem. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 3529–3536 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘凯, 谢英荷, 李廷亮, 马红梅, 张奇茹, 姜丽伟, 曹静, 邵靖琳. 减氮覆膜对黄土高原小麦产量及养分吸收利用的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 2595–2607.
Liu K, Xie Y H, Li T L, Ma H M, Zhang Q R, Jiang L W, Cao J, Shao J L. Effects of nitrogen-reducing coating film on wheat yield and nutrient absorption and utilization in dryland of loess. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 2595–2607 (in Chinese with English abstract).
- [24] 高德荣, 宋归华, 张晓, 张伯桥, 李曼, 江伟, 吴素兰. 弱筋小麦扬麦 13 品质对氮肥响应的稳定性分析. 中国农业科学, 2017, 50: 4100–4106.
Gao D R, Song G H, Zhang X, Zhang B Q, Li M, Jiang W, Wu S L. Stability analysis of response of weak gluten wheat Yangmai 13 quality to nitrogen fertilizer. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 4100–4106 (in Chinese with English abstract).
- [25] 刘苹, 谭德水, 徐钰, 林海涛, 李彦, 宋效宗, 沈玉文, 刘兆辉. 施肥方法对小麦专用控释氮肥肥效的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 3897–3908.
Liu P, Tan D S, Xu Y, Lin H T, Li Y, Song X Z, Shen Y W, Liu Z H. Effects of fertilization methods on fertilizer efficiency of controlled-release nitrogen fertilizer for wheat. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3897–3908 (in Chinese with English abstract).
- [26] 惠晓丽, 王朝辉, 罗来超, 马清霞, 王森, 戴健, 靳静静. 长期施用氮磷肥对旱地冬小麦籽粒产量和锌含量的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 3175–3185.
Hui X L, Wang C H, Luo L C, Ma Q X, Wang S, Dai J, Jin J J. Effects of long-term application of nitrogen and phosphorus fertilizer on grain yield and zinc content of winter wheat in dryland. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 3175–3185 (in Chinese with English abstract).
- [27] 高新楼, 刘钟栋, 史芹, 刘鹏, 秦中庆, 马巧云. 糯小麦淀粉糊化黏度特性的研究. 粮食与饲料工业, 2008, (6): 13–15.
Gao X L, Liu Z D, Shi Q, Liu P, Qin Z Q, Ma Q Y. Study on gelatinization viscosity characteristics of waxy wheat starch. *Grain Feed Ind*, 2008, (6): 13–15 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张敏, 赵城, 刘希伟, 宋霄君, 张玉春, 杨敏, 周齐齐, 蔡瑞国. 施氮量对糯小麦和非糯小麦籽粒淀粉组分与理化特性的影响. 麦类作物学报, 2017, 37: 786–793.
Zhang M, Zhao C, Liu X W, Song X J, Zhang Y C, Yang M, Zhou Q Q, Cai R G. Effect of nitrogen application rate on starch composition and physicochemical properties of waxy wheat and non-waxy wheat. *J Triticeae Crops*, 2017, 37: 786–793 (in Chinese with English abstract).
- [29] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 宋晓, 冯辉, 韩巧霞. 施氮水平对小麦籽粒淀粉粒度分布及淀粉粒糊化特性的影响. 西北农业学报, 2010, 19(11): 43–47.
Ma D Y, Guo T C, Wang C Y, Song X, Feng H, Han Q X. Effects of nitrogen application level on starch particle size distribution and starch gelatinization characteristics of wheat grains. *Northwest J Agric*, 2010, 19(11): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- [30] 王正, 王石垒, 吴群, 徐岩. 谷物蛋白对白酒发酵过程中微生物群落及其代谢多样性的调控. 微生物学通报, 2021, 48: 4167–4177.
Wang Z, Wang S L, Wu Q, Xu Y. Regulation of cereal protein on microbial community and metabolic diversity during liquor fermentation. *Microbiol Rep*, 2021, 48: 4167–4177 (in Chinese with English abstract).
- [31] 苟才明. 粮酿兼用玉米种质评价、品种筛选及优化种植模式研究. 四川农业大学博士学位论文, 四川成都, 2015.
Gou C M. Germplasm Evaluation, Variety Screening and

- Optimization of Planting Patterns of Grain-stirring Maize. PhD Dissertation of Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陆佳玲, 陈双, 徐岩. 清香型白酒降度过程中香气感知特征及风味组分挥发性变化规律. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 36–42.
- Lu J L, Chen S, Xu Y. Aromatic perception characteristics and volatile variation of flavor components during degradation of fen-flavor liquor. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(15): 36–42 (in Chinese with English abstract).
- [33] 庄名扬. 中国白酒香味物质形成机理及酿酒工艺的调控. *酿酒*, 2007, (2): 109–113.
- Zhuang M Y. Formation mechanism of aroma substances in Chinese liquor and regulation of liquor-making process. *Mak Win*, 2007, (2): 109–113 (in Chinese with English abstract).
- [34] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速黏度仪法》. GB/T 24853-2010, 2010.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. General Pasting Method for Wheat or Rye Flour or Starch-using the Rapid Visco Analyzer. GB/T 24853-2010, 2010 (in Chinese).
- [35] Zhang T, Wang Z, Yin Y, Cai R, Yan S, Li W. Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits. *J Agron Crop Sci*, 2010, 196: 1–8.
- [36] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法》. GB/T 7648-1987, 1987.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Determination of Amylose in Rice, Maize and Millet Grains. GB/T 7648-1987, 1987 (in Chinese).
- [37] 姬玉梅. 三种小麦蛋白质测定方法比较. *农业科技通讯*, 2011, (10): 47–49.
- Ji Y M. Comparison of three wheat protein determination methods. *Bull Agric Sci Technol*, 2011, (10): 47–49 (in Chinese with English abstract).
- [38] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《食品中脂肪的测定》. GB 5009.6-2016, 2016.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Determination of Fat in Food. GB 5009.6-2016, 2016 (in Chinese).
- [39] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《食品中灰分的测定》. GB 5009.4-2016, 2016.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Determination of Ash in Food. GB 5009.4-2016, 2016 (in Chinese).
- [40] 冯雨. 小麦软硬度对高温大曲的影响. *酿酒*, 2019, 46(2): 88–89.
- Feng Y. Effect of wheat hardness on high temperature Daqu. *Mak Win*, 2019, 46(2): 88–89 (in Chinese with English abstract).
- [41] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《小麦硬度测定 硬度指数法》. GB/T 21304-2007, 2007.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Wheat Hardness Determination Hardness Index Method. GB/T 21304-2007, 2007 (in Chinese).
- [42] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 《粮油检验 容重测定》. GB/T 5498-2013, 2013.
- Supervising Department of Quality and Technology of China. National Standard of the People's Republic of China. Determination of Bulk Density of Grain and Oil Test. GB/T 5498-2013, 2013 (in Chinese).
- [43] 王福荣. 酿酒分析与检测, 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2012. pp 35–36.
- Wang F R. *Brewing Analysis and Detection*, 2nd edn. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. pp 35–36 (in Chinese).
- [44] 杜世超. 收获期降雨对春小麦穗发芽和产量品质的影响. 黑龙江八一农垦大学博士学位论文, 黑龙江大庆, 2021.
- Du S C. Effect of Rainfall on Preharvest Germination, Yield and Quality of Spring Wheat. PhD Dissertation of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [45] 姜东, 于振文, 李永庚, 余松烈. 施氮水平对鲁麦22籽粒淀粉合成的影响. *作物学报*, 2003, 29: 462–467.
- Jiang D, Yu Z W, Li Y G, Yu S L. Effect of nitrogen application level on starch synthesis of Lumai 22. *Acta Agron Sin*, 2003, 29: 462–467 (in Chinese with English abstract).
- [46] 李伯群, 余国东, 马强, 周凤云, 廖敦秀, 张丕辉, 杨明. 糯小麦与普通小麦品质性状差异比较研究. *西南农业学报*, 2011, 24: 414–417.
- Li B Q, Yu G D, Ma Q, Zhou F Y, Liao D X, Zhang P H, Yang M. Comparative study on quality characters of waxy wheat and common wheat. *Southwest Agric J*, 2011, 24: 414–417 (in Chinese with English abstract).
- [47] 姚金保, 马鸿翔, 张平平, 张鹏, 杨学明, 周森平. 施氮量和种植密度对弱筋小麦宁麦18籽粒产量和蛋白质含量的影响. *西南农业学报*, 2017, 30: 1507–1510.
- Yao J B, Ma H X, Zhang P P, Zhang P, Yang X M, Zhou N P. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yield and protein content of weak gluten wheat Ningmai 18. *Southwest Agric J*, 2017, 30: 1507–1510 (in Chinese with English abstract).
- [48] 何中虎, 林作楫, 王龙俊, 肖志敏, 万富世, 庄巧生. 中国小麦品质区划的研究. *中国农业科学*, 2002, 35: 359–364.
- He Z H, Lin Z Y, Wang L J, Xiao Z M, Wan F S, Zhuang Q S. Study on wheat quality regionalization in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35: 359–364 (in Chinese with English abstract).
- [49] 王晨阳, 扶定, 郭天财, 周国勤, 贺德先, 马冬云. 糯小麦与普通小麦配粉黏度参数的比较研究. *河南农业大学学报*, 2006, 40: 578–583.
- Wang C Y, Fu D, Guo T C, Zhou G Q, He D X, Ma D Y. Comparative study on viscosity parameters of waxy wheat and common wheat. *Acta Agric Univ Henan*, 2006, 40: 578–583 (in Chinese with English abstract).
- [50] 梁荣奇, 张义荣, 唐朝晖. 糯性普通小麦的籽粒成分和淀粉品质研究. *中国粮油学报*, 2002, (4): 14–16.
- Liang R Q, Zhang Y R, Tang C H. Study on grain composition and starch quality of waxy common wheat. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2002, (4): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- [51] 张健, 高海燕, 赵镭, 尹京苑. 白酒理化指标及其与香气品质的关系. *食品科学*, 2010, 31(10): 283–286.
- Zhang J, Gao H Y, Zhao L, Yin J Y. Physical and chemical in-

- dexes of liquor and their relationship with aroma quality. *Food Sci*, 2010, 31(10): 283–286 (in Chinese with English abstract).
- [52] 宋波. 白酒中各种成分对酒质的影响. *酿酒科技*, 2011, (12): 65–67.
Song B. Effects of various components in liquor on liquor quality. *Liquor-mak Sci Technol*, 2011, (12): 65–67 (in Chinese with English abstract).
- [53] 谢方安. 谈白酒香气成分和作用. *酿酒*, 2006, (5): 52–55.
Xie F A. Aroma components and function of liquor. *Mak Win*, 2006, (5): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- [54] 肖世政. 降低杂醇油提高酒精质量适应新标准. *酿酒*, 2003, (6): 39–40.
Xiao S Z. Reducing fusel oil and improving alcohol quality meet the new standard. *Making Wine*, 2003, (6): 39–40 (in Chinese with English abstract).
- [55] 代汉聪, 张宿义, 周军, 代宇, 赵小波, 蔡亮, 邵燕, 代小雪. 低度白酒贮存过程中风味质量变化研究. *酿酒科技*, 2020, (7): 27–32.
Dai H C, Zhang S Y, Zhou J, Dai Y, Zhao X B, Cai L, Shao Y, Dai X X. Study on the change of flavor quality of low-alcohol liquor during storage. *Liquor-Mak Sci Technol*, 2020, (7): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- [56] 信春晖, 许玲, 于盼盼, 郑义, 赵纪文. 浅述粮谷原料在白酒酿造中的作用. *酿酒*, 2016, 43(5): 44–48.
Xin C H, Xu L, Yu P P, Zheng Y, Zhao J W. The role of grain raw materials in liquor brewing. *Mak Win*, 2016, 43(5): 44–48 (in Chinese with English abstract).
- [57] 宫俐莉, 李安军, 孙金沅, 李贺贺, 孙啸涛, 黄明泉, 郑福平, 孙宝国. 溶剂辅助风味蒸发法与顶空-固相微萃取法结合分析白酒酒醅中挥发性风味成分. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9): 169–177.
Gong L L, Li A J, Sun J Y, Li H H, Sun X T, Huang M Q, Zheng F P, Sun B G. Analysis of volatile flavor components in liquor fermented grains by solvent assisted flavor evaporation and headspace solid phase microextraction. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(9): 169–177 (in Chinese with English abstract).
- [58] 李娜, 陈兴杰, 范文来, 程伟, 陈双, 杨金玉, 张杰, 潘天全. 基于主成分分析的金种子酿香白酒可挥发性风味成分评价. *酿酒*, 2021, 48(5): 93–100.
Li N, Chen X J, Fan W L, Cheng W, Chen S, Yang J Y, Zhang J, Pan T Q. Evaluation of volatile flavor components in golden seed fuxiang liquor based on principal component analysis. *Mak Win*, 2021, 48(5): 93–100 (in Chinese with English abstract).
- [59] 陆伦维, 钟敏, 冯小兵, 程平言, 张健, 徐松. 基于主成分分析判别不同等级酱香型白酒的研究. *酿酒科技*, 2020, (2): 17–21.
Lu L W, Zhong M, Feng X B, Cheng P Y, Zhang J, Xu S. Study on different grades of maotai-flavor liquor based on principal component analysis. *Liquor-Mak Sci Technol*, 2020, (2): 17–21 (in Chinese with English abstract).