

高温、高湿条件下模拟仓储小麦品质与微生物群落结构的变化

尚玉婷¹, 杨薇^{2*}, 张民¹

(¹天津农学院食品科学与生物工程学院 天津 300392

²天津农学院基础科学学院 天津 300392)

摘要 研究小麦从入库储藏到发现菌丝体过程中,其品质和微生物群落结构的变化趋势。以天津市实仓储藏的硬质白小麦籽粒为研究对象,以三角瓶为储藏容器,分别在 30℃、60%RH、40℃、80%RH 条件下对小麦进行模拟仓储,储藏时间为 0~120 d。通过监测小麦籽粒的水分、色差、蛋白质、脂肪、淀粉、脂肪酸等品质指标变化,以及霉菌总数、高通量测序结果评估模拟粮库中小麦在不同储藏阶段的品质与真菌群落结构变化。结果表明,在 30℃、60%RH 条件下,储藏 120 d 内,小麦品质呈缓慢下降趋势,80~120 d 曲霉属相对丰度迅速增加。在 40℃、80%RH 条件下,小麦品质劣变更快,在 60 d 时曲霉属相对丰度达 100%,小麦产生可见菌丝体。研究表明随着储藏温度与相对湿度的升高,小麦品质变化速度明显加快,菌丝体产生速度加快。

关键词 小麦; 模拟仓储; 高通量测序; 品质变化

文章编号 1009-7848(2022)04-0265-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.026

小麦是温带国家的主要粮食作物^[1],为人体提供必需氨基酸、矿物质、维生素以及有益的植物化学物质和膳食纤维成分等^[2]。然而,由于小麦中富含淀粉、蛋白质、脂肪等营养物质,有助于微生物的生长,若存储不当,则会引起小麦发霉变质^[3-4],造成严重经济损失,并产生真菌毒素危害人体健康^[5-6]。小麦的霉变可能发生在收割、储存、运输、销售多个阶段,由于储存占整个周期比重最大,最易发生霉变。粮库内环境的温度、湿度是决定小麦霉变的关键因素^[7-8]。全世界约有 5%~7%的粮食每年因被霉菌侵袭而不可食用^[9]。控制霉菌生长是粮食仓储的主要任务。明晰小麦仓储过程中霉菌的变化规律及霉菌活动对小麦品质的影响,有利于对实际仓储小麦进行有针对性的预防,以减少小麦仓储损失,保护良好品质^[10-11]。

为了研究北方粮库中经磷化铝环流熏蒸过的硬质白小麦储藏过程中霉变的影响因素,本试验通过分析天津市 7~10 月粮仓内储藏环境的变化,选取该段时间内温、湿度较高的储藏条件,对小麦进行模拟储藏。跟踪测定储藏期间小麦的各项理化指标,并用高通量测序技术探究模拟储藏期间

小麦的微生物群落结构变化,探明小麦发生的品质变化。

1 材料和方法

1.1 材料

硬质白小麦,2020 年产地为河北省,仓房位于天津市静海区(经纬度 117.2E,39.13N),仓房类型为高大平房仓,入库前采用磷化铝环流熏蒸,2020 年 8 月入库后测得小麦水分为 10.85%,最高仓温 36.3℃,最低仓温 18.8℃,仓内湿度 61.9%。

1.2 试剂

HiPure Soil DNA Kit 土壤 DNA 基因组提取试剂盒,OMEGA 公司;AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒,AXYGEN 公司;PCR 所用试剂,大连宝生物公司。

1.3 仪器与设备

SPX-250B-Z 生化培养箱,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;CM-5 分光测色计,日本柯尼卡美能达有限公司;101-1AB 电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;NM120-Analyst 核磁共振成像分析仪,上海纽迈电子科技有限公司;HERACLES II 快速电子气味分析仪,法国 ALpha Mos 公司;立式高压蒸汽灭菌锅,上海申安医疗器械厂;SW-CJ-2 超净台,孚夏超净工作台;9700 型 PCR 仪,美国 ABI GeneAmp®公司;高通量测序

收稿日期: 2021-08-15

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2019YFC1605305-03)

作者简介: 尚玉婷(1998—),女,硕士生

通信作者: 杨薇 E-mail: yangwei811127@126.com

仪, Illumina 公司; 台式离心机, 德国艾本德股份公司; 凝胶成像系统, 莫纳生物科技有限公司; EPS6000 电泳仪, Tanon。

1.4 方法及测定指标

1.4.1 方法 取样方法依据 GB/T 5491-1985《粮食、油料检验扦样、分样法》^[12]。取样后将样品放置于样品袋中, 4℃备用。为避免每次取样存在分层误差以及杂菌污染, 本试验将 500 mL 三角瓶(空瓶)用棉绳将边长为 20 cm 的 8 层纱布系于瓶口, 准备完毕后高压蒸汽灭菌, 待冷却后在超净台中取 150 g 小麦置于瓶中, 放置于杀菌后的恒温恒湿培养箱中培养, 取第 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 天的小麦进行试验。

1.4.2 理化指标

1) 色差 用色差仪测定样品色值, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值的变化。 L^* 值代表亮度, a^* 值代表红绿度, b^* 值代表黄蓝色。

2) 水分 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法 直接干燥法^[13]进行测定。

3) 蛋白质 按照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法 凯氏定氮法^[14]进行测定。

4) 脂肪 按照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第二法 酸水解法^[15]进行测定。

5) 淀粉 按照 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》第二法 酸水解法^[16]进行测定。

6) 脂肪酸值: 按照 GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》第一法 内标法^[17]进行测定。

7) 小麦外部霉菌量: 参照 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》第一法 霉菌和酵母平板计数法^[18]测定。

1.4.3 基因组 DNA 提取及 PCR 过程 按照 DNA 提取试剂盒说明操作步骤, 提取小麦总 DNA, 每个样本 3 个重复, 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测完整性, 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒切胶回收 PCR 产

物, Tris_HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测, 合格样品保存待用。

以环境样本中微生物总 DNA 为模板, 真菌扩增区域为 ITS1 区, 引物为 ITS1F、ITS2R^[19], PCR 扩增条件: 95℃预变性 3 min, 95℃变性 30 s, 55℃退火 30 s, 72℃延伸 45 s, 扩增 32 个循环, 72℃再延伸 5 min, 4℃保存。PCR 采用 25 μL 反应体系: 5×FastPfu Buffer (5 μL), 2.5 mmol/L dNTPs (2.5 μL), 上游引物 1.0 μL, 下游引物 1.0 μL, FastPfu Polymerase (0.5 μL), BSA (0.25 μL), Template DNA (10 ng), ddH₂O 补足至 25 μL。

1.4.4 高通量测序 将纯化后的 PCR 产物送至元萃生物公司, 采用 Illumina PE250 高通量测序平台进行文库构建和上机测序。Illumina PE250 测序得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接, 同时对序列质量进行质控和过滤, 区分样本后进行操作分类单元 (Operational taxonomic units, OTU) 聚类分析和物种分类学分析, 基于 OTU 聚类分析结果, 可以对 OTU 进行多种多样性指数分析, 以及对测序深度的检测。

1.5 数据处理

理化指标使用 SPSS 26.0 软件分析比较, 测试试验均重复 3 次。使用 Origin 2021 软件作图, 使用 Excel 软件做表。

Illumina PE250 测序得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接, 同时对序列质量进行质控和过滤, 区分样本后进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析, 基于 OTU 聚类分析结果, 可以对 OTU 进行多种多样性指数分析, 以及对测序深度的检测; 基于分类学信息, 可以在各个分类水平上进行群落结构的统计分析。在上述分析的基础上, 可以进行一系列群落结构和系统发育等深入的统计学和可视化分析。

2 结果与分析

2.1 营养成分分析

2.1.1 小麦籽粒与面粉色泽变化 小麦质量与颜色密不可分, 然而感官评价中人眼会受到视觉偏好的影响^[20], 为了消除此影响, 用色差仪记录小麦模拟储藏期间籽粒颜色及面粉颜色的变化, 小麦籽粒黄色素是影响小麦面粉色泽的主要因素之

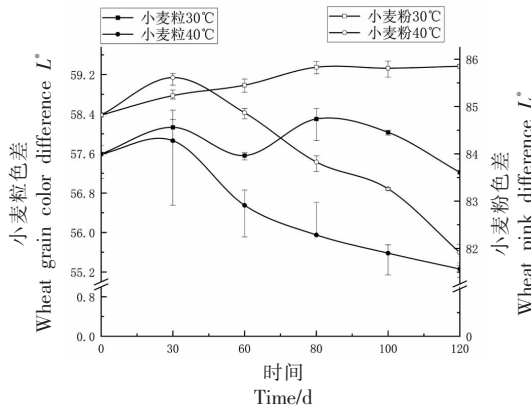


图 1 小麦色差 L^* 值变化

Fig.1 Wheat color difference L^* value change

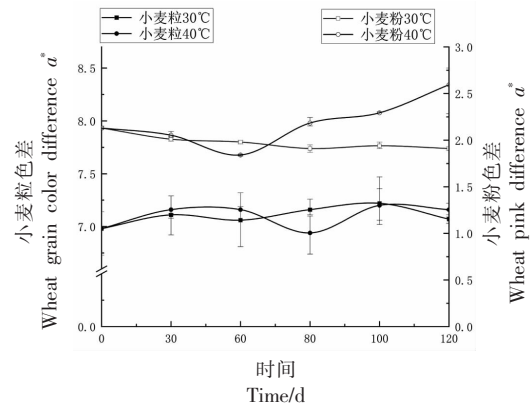


图 2 小麦色差 a^* 值变化

Fig.2 Wheat color difference a^* value change

—^[21]。如图 1~3 所示,在小麦模拟储藏过程中,在 30 °C,60%RH 条件下, L^* 值变化不明显,两种条件下小麦粒和小麦粉 a^* 和 b^* 色差变化不明显且趋势基本一致。在 40 °C,80%RH 条件下,小麦粒和小麦粉的 L^* 值变化明显,呈下降趋势,其原因可能为此条件下微生物活跃,使得小麦表面滋生霉菌进一步导致颜色加深^[22],小麦色差 L^* 值变化间接反应出小麦品质变化。

2.1.2 水分变化

2.1.2.1 国标法检测 小麦的储存受温度和水分

制约,温度和水分越高安全性越低,自然条件下小麦的安全储存水分含量应控制在 8%~14% 之间^[23]。如图 4 所示,在 0~120 d 储藏过程中,小麦籽粒中的水分含量逐渐升高。在 30 °C,60%RH 环境下储藏的小麦水分仍可以保持在安全水分以下,且未发现肉眼可见菌丝体。在 40 °C,80%RH 条件下,储藏的小麦在 80 d 时水分含量为 14.96%,超过安全水分,此时可在小麦表面发现明显的菌丝体。

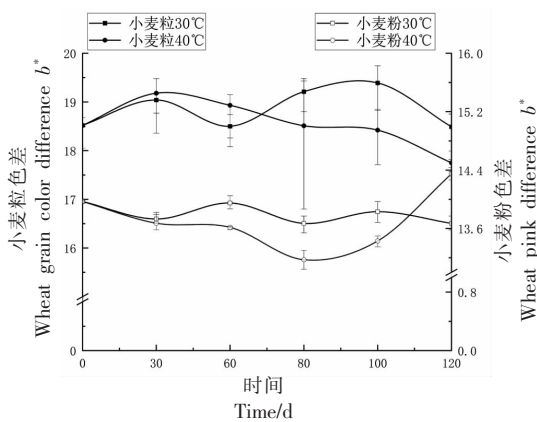


图 3 小麦色差 b^* 值变化

Fig.3 Wheat color difference b^* value change

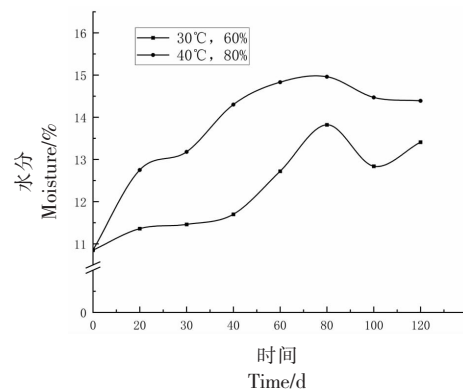


图 4 小麦水分变化

Fig.4 Wheat moisture changes

2.1.2.2 MRI 检测水分迁移变化 利用核磁共振成像分析仪的弛豫谱图分析小麦籽粒水分内部变化。通过分析得出,小麦在模拟储藏过程中存在 3 种状态的水,如图 5 从左至右分别为: T_{21} (0.1~10 ms) 强结合水、 T_{22} (10~100 ms) 弱结合水、 T_{23}

(10~1 000 ms) 自由水。模拟仓储中,小麦中水分主要以强结合水(T_{21})的形式存在,流动性差,与非水组分如淀粉、蛋白质或其它大分子物质通过水-离子、水-偶极缔合作用紧密结合^[24]。由图 5 可知,从第 0 天开始,随着储藏时间延长, T_{21} 、 T_{22} 弛豫时

间变长,曲线开始向右移,在两种温度条件下,变化趋势基本一致,40℃、80%RH条件下较30℃、60%RH条件下峰顶点时间迁移更快。在40℃环境下,由图6b可知,强结合水与弱结合水所占比例增加,表明水分和底物结合由紧密变稀疏^[25]。

由图6可知,强结合水的峰面积(A_{21})在两种条件下有缓慢增加的趋势。在30℃、60%RH环境

下弱结合水峰面积(A_{22})无变化,自由水峰面积由8%减少至6%;在40℃、80%RH环境下弱结合水峰面积(A_{22})由占比2%增加至8%,自由水峰面积有减小趋势,由占比8%减小至1%,变化明显,说明可能此条件下流动性较大的自由水为环境中微生物提供了水分,结合出现可见菌丝体结果说明此条件不易于小麦储存。

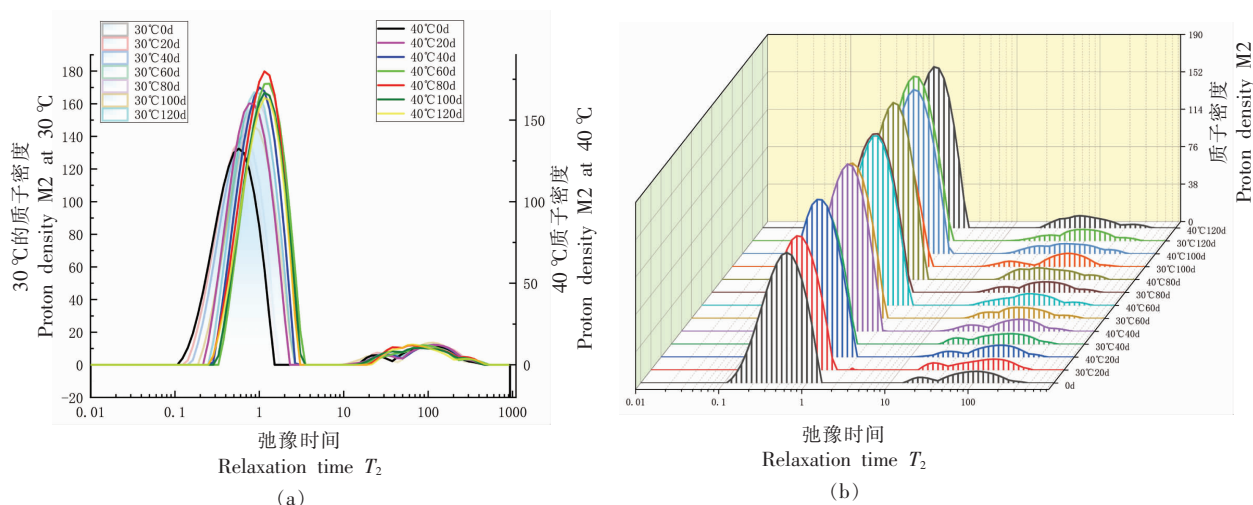


图5 小麦横向弛豫时间 T_2 平面图(a) T_2 直观图(b)

Fig.5 Wheat transverse relaxation time T_2 plane diagram (a) T_2 intuitive diagram (b)

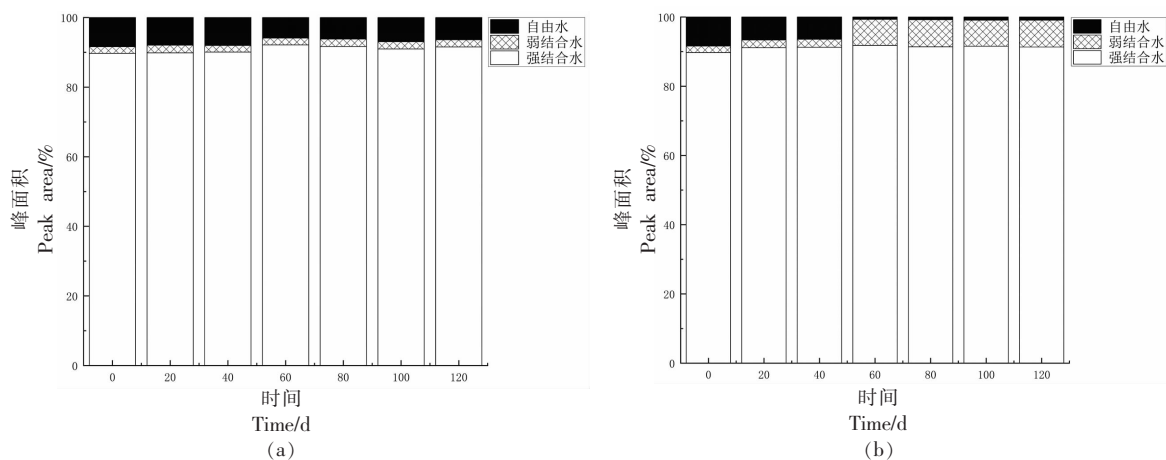


图6 3种状态水的比例:30℃、60%RH环境(a)和40℃、80%RH环境(b)

Fig.6 The proportion of water in the three states: 30℃, 60%RH (a) and 40℃, 80%RH (b)

2.1.3 蛋白质变化 如图7所示,结果表明随着模拟仓储时间的延长,在0~30d时蛋白质含量在12.5%左右波动,而后呈上升趋势,在40d时达到15.2%,而后趋于平稳。这可能是由于新收获的小麦籽粒中含有大量低分子质量蛋白质,在高温、高

湿条件下储藏,会促使其快速进入萌动期,导致小麦籽粒中醇溶性蛋白的肽链之间发生氧化反应形成二硫键,再次聚合成大分子谷蛋白,从而导致蛋白质含量增加^[26]。

2.1.4 淀粉变化 淀粉是小麦中含量最高,也是

最重要的碳水化合物,约占小麦质量的57%~67%。如图8所示,小麦在储藏过程中淀粉含量在67.1%~68.8%范围内波动,没有明显变化。

2.1.5 脂肪变化 脂类是小麦重要营养物质之一,含量虽少,却是储藏过程中关键指标,脂肪氧化分解^[27]会导致小麦产品品质劣变。如图9所示,刚收获的小麦籽粒中脂肪含量为1.8%,随着储藏时间延长,当储藏时间为40 d时,呈明显下降趋势。且随着储藏时间延长,在40℃、80%RH条件下,脂肪含量下降较快,80 d时达到1.3%,下降了

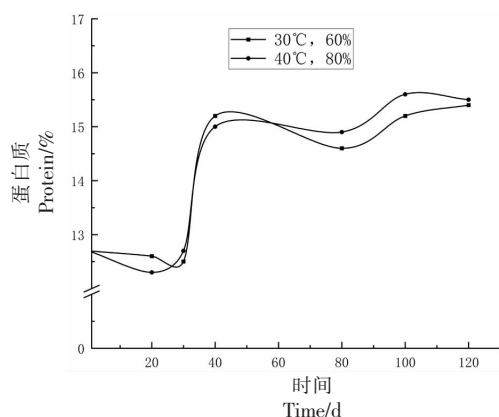


图7 小麦蛋白质变化

Fig.7 Wheat protein changes

约28%。

2.1.6 脂肪酸的变化 小麦籽粒中含有一定量的脂肪酸^[28],其中亚油酸为不饱和脂肪酸,其含量占总脂肪酸的60%^[29-30],是小麦中重要的营养成分。如图10所示,刚收获的小麦总脂肪酸含量为1.95 mg/100 g,在储藏0~120 d内总脂肪酸总体呈下降趋势。在40℃、80%RH条件下,储藏120 d时总脂肪酸为1.39 mg/100 g,与刚入库时相比降低了约29%。

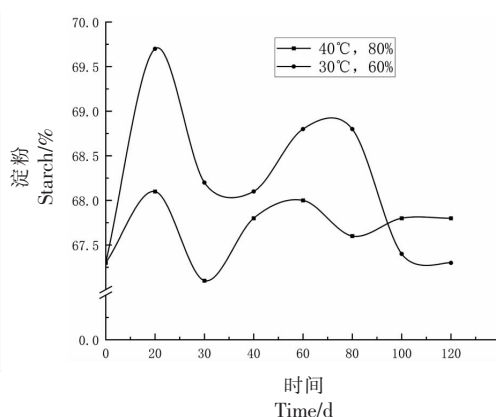


图8 小麦淀粉变化

Fig.8 Wheat starch changes

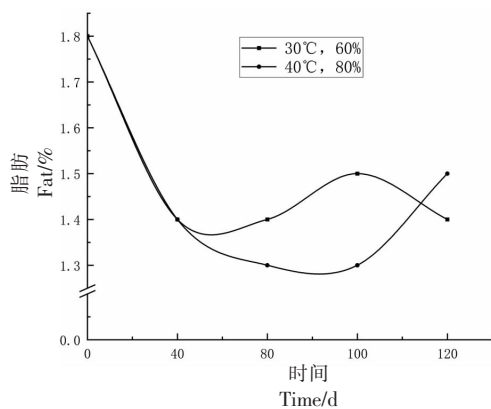


图9 小麦脂肪变化

Fig.9 Wheat fat changes

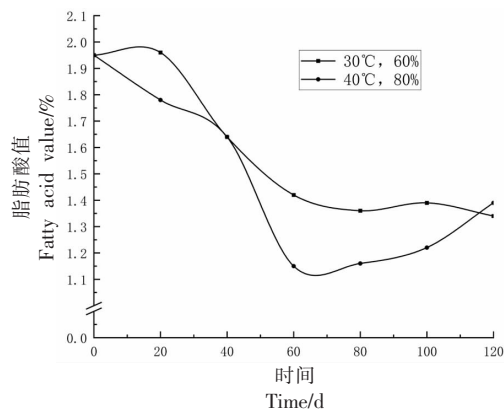


图10 小麦总脂肪酸变化

Fig.10 Changes in total fatty acids in wheat

如图11所示,在所有样品中共检测到6种主要脂肪酸,小麦脂肪酸中亚油酸含量最多且变化趋势与总脂肪酸趋势基本一致,在两种储藏条件下,小麦中亚油酸含量均呈下降趋势,由刚入库的1.16 mg/100 g到储藏120 d时30℃环境下0.804 mg/100 g,下降了约30%。在40℃、80%RH条件

下,小麦籽粒中的亚油酸含量下降更快,在第60天时下降至0.694 g/100 g,而在30℃、60%RH条件下,亚油酸含量下降较为平缓,80 d时降至0.81 mg/100 g。由此可见,高温、高湿环境下储藏小麦,可以加速其籽粒中亚油酸的氧化,降低小麦的营养价值。

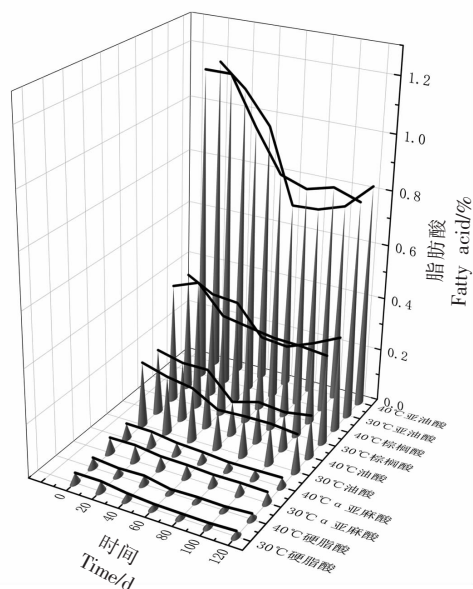


图 11 小麦各脂肪酸变化

Fig.11 Changes of fatty acids in wheat

2.2 微生物群落结构与多样性分析

2.2.1 储藏过程中小麦 α 多样性分析 表 1 为小麦模拟储藏过程中,各阶段样品的多样性指数。在 30℃、60%RH 条件下,随着储藏时间的延长,Shannon 指数、Ace 指数、OTU 数目均逐渐增大,表明小麦中真菌多样性与丰富度逐渐增大。在 40℃、80%RH 条件下,Shannon 指数、Ace 指数、OTU 数目先增大后减小,表明小麦菌丝体增长速度较快,各种微生物迅速生长,储藏 60 d 时,Shannon 指数为 0.02,小麦中真菌多样性大大降低,某种有害菌占比极高,菌丝体已显现。在 40℃、80%RH

条件下的小麦微生物群落变化程度远高于 30℃、60%RH 条件下的小麦,结果表明,高温、高湿的储藏条件更易产生菌丝体。

2.2.2 样品所含 OTU 数目分析 图 12 为在 30℃、60RH%及 40℃、80RH%储藏条件下,不同储藏时间的真菌 OTU 数目维恩图,在 30℃、60RH%条件下,不同储藏时间共有 OTU 87 个,原粮含有特有 OTU 5 个,40 d 样品含有特有 OTU 6 个、60 d 样品含有特有 OTU 11 个,80 d 样品含有特有 OTU 15 个,120 d 样品含有特有 OTU 19 个。随储藏时间延长,样品中特有 OTU 数目逐渐增加,表示不断有新的微生物出现。在 40℃、80RH%条件下,不同储藏时间共有 OTU 23 个,原粮含有特有 OTU 6 个,20 d 样品含有特有 OTU 21 个,40 d 样品含有特有 OTU 39 个,60 d 样品含有特有 OTU 0 个,120 d 样品含有特有 OTU 1 个。随储藏时间延长,样品中特有 OTU 数目先迅速增加,后减少为 0,表示群落变化十分迅速,60 d 后小麦中优势霉菌占比很大。

2.2.3 贮藏期小麦真菌群落结构变化 为达到最佳视图效果,在众多检出微生物中,将丰度低于 1%的部分合并并在其它(Other)中表示(图 13)。

图 13 为不同储藏时间小麦样品中真菌群落结构,链格孢属(*Alternaria*)为储藏过程中的优势菌属,随着储藏时间延长,其相对丰度呈逐渐下降的趋势。在 30℃、60%RH 的样品中,储藏 120 d 时,曲霉属(*Aspergillus*)被检出,且相对丰度较高,表明在 80~120 d 储藏阶段,小麦中有害菌属丰度升高。此时未发现肉眼可见菌丝体(图 14a)。在 40

表 1 真菌群落多样性指数统计

Table 1 Statistics of fungal community diversity index

样品	Reads	OTU	Ace	Chao	覆盖率/%	Shannon	Simpson
0 d	158 129	153	213	188	99.9	1.14	0.5934
30℃ 40 d	216 019	150	181	197	99.9	0.42	0.8842
30℃ 60 d	154 679	157	186	173	99.9	1.23	0.5322
30℃ 80 d	180 516	181	206	197	99.9	1.38	0.4891
30℃ 120 d	166 251	180	203	198	99.9	1.6	0.3483
40℃ 20 d	154 977	184	214	203	99.9	0.82	0.7346
40℃ 40 d	220 344	212	217	215	99.9	1.65	0.4597
40℃ 60 d	160 775	40	56	50	99.9	0.02	0.9947
40℃ 120 d	157 682	35	52	53	99.9	0.01	0.9973

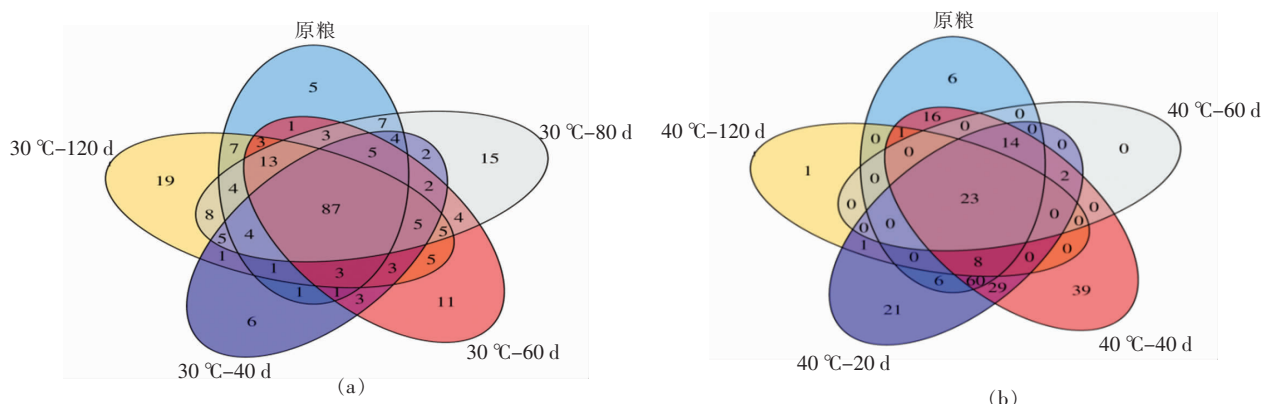


图 12 小麦真菌群落维恩图:30 °C、60RH%环境 (a) 和 40 °C、80RH%环境 (b)

Fig.12 Venn diagram of wheat fungus community: 30 °C, 60RH% environment (a) and 40 °C, 80RH% environment (b)

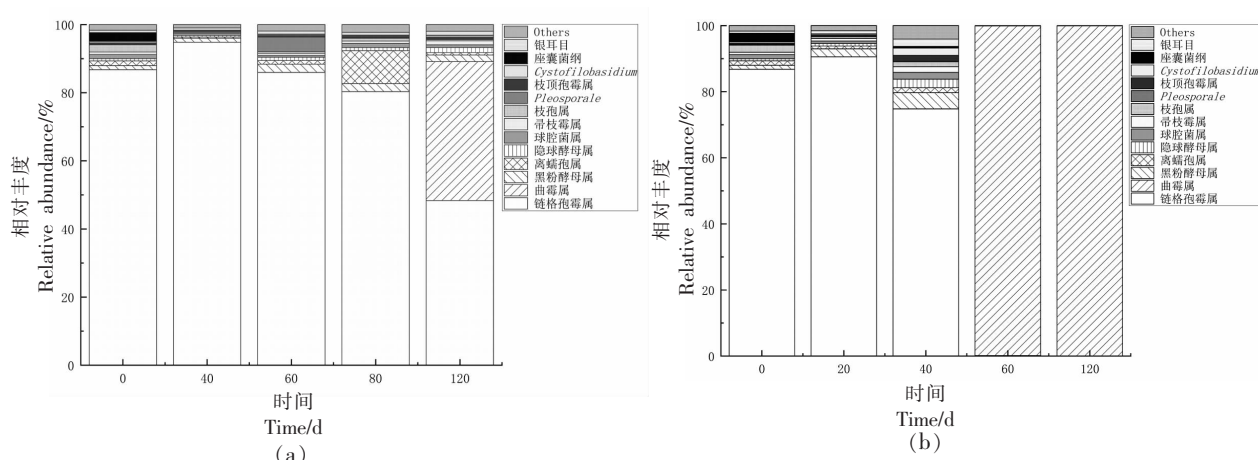


图 13 小麦属水平群落组成:30 °C、60RH%环境 (a) 和 40 °C、80RH%环境 (b)

Fig.13 Triticum horizontal community composition: 30 °C, 60RH% environment (a) and 40 °C, 80RH% environment (b)

℃、80%RH 的样品中, 储藏 40 d 时, 链格孢属 (*Alternaria*) 相对丰度最高, 且优势明显; 储藏 60 d 后, 曲霉属 (*Aspergillus*) 的相对丰度达 100%, 表明在 40~60 d 储藏阶段, 小麦微生物群落变化迅速; 储藏 60 d 后, 小麦中微生物均为曲霉属 (*Aspergillus*), 小麦上可明显观察到菌丝体 (图 14b)。

2.2.4 储藏过程中小麦 β 多样性分析 根据样品在 PCA 图中的距离可判断样品间的相似度, 如图 15a 所示, 图中 A 组为原粮组, B 组为 30 °C 存放的样品, C 组为 40 °C 存放的样品。已产生菌丝体的样品 (40 °C, 60 d; 40 °C, 120 d) 和有变霉趋势的样品 (30 °C, 120 d) 距离其它样品距离较远, 得到明显区分。层级聚类图中树枝间的距离表示不同样本的距离, 结果显示: 所有样品可分为 3 类, 产生菌丝体的小麦 (40 °C, 60 d; 40 °C, 120 d) 为一类,

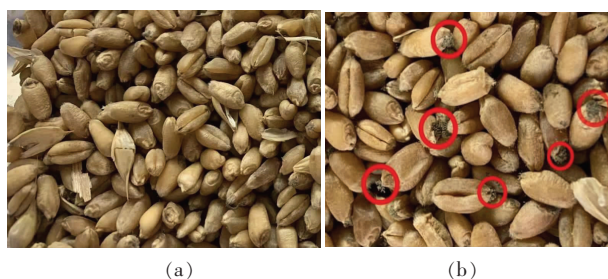


图 14 小麦储藏 120 d 后实况:30 °C、60RH%环境 (a) 和 40 °C、80RH%环境 (b)

The actual condition of wheat after storage for 120 days: 30 °C, 60RH% environment (a) and 40 °C, 80RH% environment (b)

有变霉趋势的小麦 (30 °C, 120 d) 为一类, 情况良好的样品 (0 d; 30 °C, 40 d; 30 °C, 60 d; 30 °C, 80 d; 40 °C, 20 d; 40 °C, 40 d) 为一类。

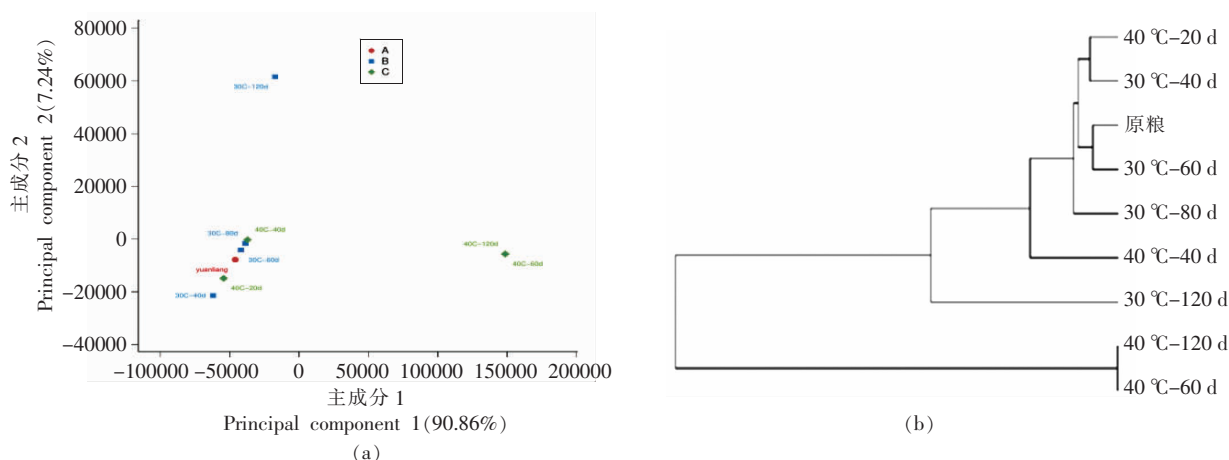


图 15 不同储藏时间小麦 PCA 分析 (a) 与层级聚类分析 (b)

Fig.15 PCA analysis of wheat in different storage periods (a) and hierarchical cluster analysis (b)

2.2.5 小麦外部霉菌数量变化 对小麦表面霉菌数量进行监测, 可以间接反应小麦在储藏过程中的品质变化。结果如表 2 所示, 在 30 °C、60%RH 条件下储藏 120 d, 小麦表面的霉菌数量整体波动

不大, 在 40 °C、80%RH 条件下储藏 40 d 后, 霉菌数量呈指数增加。由此可见, 温度、湿度越高, 小麦表面霉菌数量变化的速度越快。

表 2 小麦霉菌计数结果

Table 2 Wheat mold count results

时间	0 d	20 d	30 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d
30 °C, 60%RH	5.0×10^2	1.9×10^3	1.0×10^3	1.0×10^3	1.0×10^3	1.0×10^3	8.0×10^3	6.0×10^3
40 °C, 80%RH	5.0×10^2	4.0×10^3	8.0×10^3	1.9×10^4	2.6×10^5	1.5×10^6	6.7×10^5	7.0×10^5

3 结论

本文通过实验室模拟小麦在 30 °C、60%RH 和 40 °C、80%RH 高温高湿条件下的仓储过程, 监测小麦中水分、蛋白质、淀粉、脂肪等品质指标。结果表明, 在 30 °C、60%RH 条件下, 储藏 120 d 内, 小麦品质呈缓慢下降趋势。在 40 °C、80%RH 条件下储存的小麦, 品质劣变比较明显, 储藏 60 d 后小麦表面出现明显的菌丝体。通过高通量测序技术发现, 储藏前期小麦中优势菌属为链格孢属 (*Alternaria*), 当水分超过安全范围后, 其相对丰度迅速下降, 曲霉属 (*Aspergillus*) 逐渐成为优势菌属, 相对丰度迅速上升。在 40 °C、80%RH 条件下, 储藏 60 d 的样品中检出微生物均为曲霉属 (*Aspergillus*), 小麦表面出现明显可见菌丝体。结果表明随着温度与相对湿度的上升, 小麦曲霉属菌株迅速上升。

参 考 文 献

- [1] 王一杰, 辛岭, 胡志全, 等. 我国小麦生产、消费和贸易的现状分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5): 36-45.
WANG Y J, XIN L, HU Z Q, et al. Analysis on the status quo of wheat production, consumption and trade in my country[J]. China Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(5): 36-45.
- [2] NIGEL P, JASON J, OLAF E, et al. Agri-nutrition research: Revisiting the contribution of maize and wheat to human nutrition and health[J]. Food Policy, 2020, 100: 1-8.
- [3] ZHANG Y Y, PEI F, FANG Y, et al. Interaction between fungal community, Fusarium mycotoxins and components of harvested wheat under simulated storage conditions[J]. Journal of Agricultural

- and Food Chemistry, 2019, 67(30): 8411–8418.
- [4] 宫安东. 镰刀菌和黄曲霉菌生防菌的分离及拮抗机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
GONG A D. Isolation of *Fusarium* and *Aspergillus flavus* biocontrol bacteria and their antagonistic mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [5] WANG J N, JIANG H, CHENG Q S. High-precision recognition of wheat mildew degree based on colorimetric sensor technique combined with multivariate analysis [J]. Microchemical Journal, 2021, 168(9): 106468.
- [6] QING S Y, YUAN P Y, AI B W, et al. Variation in the microbiome, trichothecenes, and aflatoxins in stored wheat grains in Wuhan, China [J]. Toxins, 2018, 10(5): 2–14.
- [7] 岳晓禹, 张华, 陈威风, 等. 应用高通量测序技术检测小麦储藏过程中真菌群落的变化[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 109–115.
YUE X Y, ZHANG H, CHEN W F, et al. Application of high-throughput sequencing technology to detect changes in fungal community during wheat storage[J]. Food Science, 2020, 41(14): 109–115.
- [8] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260–266.
WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Coupling analysis of wheat grain pile mildew and temperature and humidity based on cloud image of temperature and humidity field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 260–266.
- [9] 张红梅, 何玉静. 电子鼻技术在粮食质量检测中的应用[J]. 农机化研究, 2009, 31(3): 180–182.
ZHANG H M, HE Y J. The application of electronic nose technology in food quality inspection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3): 180–182.
- [10] 周涛. 储藏稻谷中霉菌的生长演替规律及霉变稻谷的品质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018.
ZHOU T. Study on the growth and succession of mold in stored rice and the quality of moldy rice[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2018.
- [11] NITHYA U, CHELLADURAI V, JAYAS D S, et al. Safe storage guidelines for durum wheat [J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(4): 328–333.
- [12] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准粮食、油料检验扦样、分样法: GB/T 5491–1985[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985: 1–3.
State Food and Drug Administration. National food safety standard grain and oilseeds inspection sampling and sampling method: GB/T 5491–1985 [S]. Beijing: China Standard Press, 1985: 1–3.
- [13] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中水分的测定: GB 5009.3–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–2.
State Food and Drug Administration. National Food Safety Standard Determination of Moisture in Food: GB 5009.3–2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1–2.
- [14] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定: GB 5009.5–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–3.
State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of protein in food: GB 5009.5–2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1–3.
- [15] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中脂肪的测定: GB 5009.6–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3–4.
State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of fat in food: GB 5009.6–2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 3–4.
- [16] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中淀粉的测定: GB 5009.9–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 5–6.
State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of starch in food: GB 5009.9–2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 5–6.
- [17] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–6.
State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of fatty acids in food: GB 5009.168–2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1–6.
- [18] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品微生物学检验 霉菌和酵母计数: GB 4789.15–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–3.

- State Food and Drug Administration. National food safety standards—food microbiological inspection—mold and yeast counting: GB 4789.15—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1–3.
- [19] 吴悦妮, 冯凯, 厉舒祯, 等. 16S/18S/ITS 扩增子高通量测序引物的生物信息学评估和改进[J]. 微生物学通报, 2020, 47(9): 2897–2912.
- WU Y N, FENG K, LI S Z, et al. Bioinformatics evaluation and improvement of 16S/18S/ITS amplicon high-throughput sequencing primers[J]. Microbiology Bulletin, 2020, 47(9): 2897–2912.
- [20] BRENNAN M S, SAMANTHA A R, ANNIE R, et al. Reducing visual differences in whole grain bread prepared with hard red and hard white wheat: Application for sensory studies[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 2325–2329.
- [21] 陈杰, 白冬, 宋佳静, 等. 小麦籽粒黄色素基因型鉴定及其与色差仪参数相关分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(14): 4557–4563.
- CHEN J, BAI D, SONG J J, et al. Genotype identification of wheat grain yellow pigment and its correlation analysis with colorimeter parameters[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(14): 4557–4563.
- [22] 曹勇, 张隋鑫, 许秀颖, 等. 玉米薄饼贮藏品质分析及货架期预测模型建立[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 235–242.
- CAO Y, ZHANG S X, XU X Y, et al. Analysis of corn pancake storage quality and establishment of shelf life prediction model[J]. Food Science, 2021, 42(1): 235–242.
- [23] ABDULLAH M, ZULKIFFAL M, DIN A, et al. Discrepancy in germination behavior and physico-chemical quality traits during wheat storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): 1–11.
- [24] 陈成. 小麦不同调质方式水分分布与迁移及调质效果的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- CHEN C. Study on water distribution and migration of different conditioning methods and conditioning effects of wheat[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [25] 魏益民, 王振华, 于晓磊, 等. 挂面干燥过程水分迁移规律研究[J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 1–12.
- WEI Y M, WANG Z H, YU X L, et al. Research on the law of moisture migration during drying process of dried noodles[J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 17(12): 1–12.
- [26] 韦志彦, 王金水, 张艳, 等. 新收获小麦后熟过程中蛋白质和氨基酸含量的变化[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(2): 23–30.
- WEI Z Y, WANG J S, ZHANG Y, et al. Changes in protein and amino acid content during the ripening process of newly harvested wheat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(2): 23–30.
- [27] 宋永令, 王若兰, 穆垚. 小麦储藏过程中脂质代谢研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 19–24.
- SONG Y L, WANG R L, MU Y. Study on lipid metabolism in wheat storage[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 35(6): 19–24.
- [28] NARDUCCI V, FINOTTI E, GALLI V, et al. Lipids and fatty acids in Italian durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars[J]. Foods, 2019, 8(6): 223.
- [29] 赵福利, 钟葵, 佟立涛, 等. 不同产地小麦胚芽营养成分的比较分析[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 182–188.
- ZHAO F L, ZHONG K, TONG L T, et al. Comparative analysis of nutritional components of wheat germ in different producing areas[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 182–188.
- [30] ADELE C, GIANFRANCO M, FLORIANA B, et al. Monitoring changes of lipid composition in durum wheat during grain development[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 97: 1–37.

Changes in Quality and Microbial Community Structure of Simulated Warehouse Wheat under High Temperature and High Humidity Conditions

Shang Yuting¹, Yang Wei^{2*}, Zhang Min¹

(¹School of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural College, Tianjin 300392

²*School of Basic Science, Tianjin Agricultural College, Tianjin 300392)*

Abstract To study the changing trend of wheat quality and microbial community structure during the process from storage to discovery of mycelium. Taking the durum white wheat grains stored in Tianjin City as the research object, and using the triangular flask as the storage container, the wheat was simulated under the conditions of 30 °C, 60% RH, 40 °C and 80% RH, and the storage time was 0–120 days. By monitoring the changes of wheat grain moisture, color difference, protein, fat, starch, fatty acid and other quality indicators, as well as the total number of molds and high-throughput sequencing results, the quality and fungal community structure changes of wheat in the simulated grain depot at different storage stages were evaluated. The results showed that under the conditions of 30 °C and 60%RH, the quality of wheat decreased slowly within 120 days of storage, and the relative abundance of *Aspergillus* increased rapidly from 80 to 120 days. Under the conditions of 40 °C and 80% RH, the quality of wheat deteriorated faster. At 60 days, the relative abundance of *Aspergillus* reached 100%, and the wheat produced visible mycelium. The study showed that with the increase of storage temperature and relative humidity, the change rate of wheat quality was significantly accelerated, and the rate of mycelium production was accelerated.

Keywords wheat; simulated storage; high-throughput sequencing; quality change