

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.017

岳忠孝, 冯耐红. 气候因子对谷物品质特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 120-126.

YUE Z X, FENG N H. Influence of climate factors on quality characteristics of cereals[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 120-126.

气候因子对谷物品质特性的影响

岳忠孝, 冯耐红✉

(山西农业大学经济作物研究所, 山西 汾阳 032200)

摘要: 气候变化显著影响谷物的品质特性, 积温、昼夜温差、降雨量、气体浓度比例等气候因子均不同程度影响谷物的生长环境, 导致植物体内的生化代谢途径发生改变, 进而改变植物体的性状, 对谷物品质产生一系列影响。该文总结了不同气候因子对谷物的外观品质、蒸煮品质、营养品质、食味品质影响的研究进展, 多种研究表明气候因子对谷物的颜色光泽、粒径大小、谷粒完整度、谷物蒸煮过程中的吸水率、膨胀率、碘蓝值、固形物含量、籽粒形态微观变化、谷物中挥发性成分、谷物中蛋白质、脂肪、淀粉、微量营养元素等均产生不同程度的影响。各种气候因子对谷物品质的影响存在单一或复合作用, 但多种气候因子的复合互作关联作用调节机制还有待进一步研究。

关键词: 气候因子; 谷物; 外观品质; 蒸煮品质; 食味品质; 营养品质

中图分类号: S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2023)03-0120-07

Influence of Climate Factors on Quality Characteristics of Cereals

YUE Zhong-xiao, FENG Nai-hong✉

(The Industrial Crop Institute of Shanxi Agricultural University, Fenyang, Shanxi 032200, China)

Abstract: Climate change significantly affects the quality characteristics of cereals. Climate factors such as accumulated temperature, daily temperature difference, rainfall and gas concentration and ratio affect the growing environment of cereals to varying degrees, leading to the changes of physiological and biochemical metabolic pathways of plants, and changes the traits of plants, which could have a series of effects on the quality of cereals. This paper summarized the research progress of different climatic factors affecting on the appearance quality, cooking quality, nutritional quality and eating quality of cereals. Many studies showed that climate factors had different effects on the color luster, particle size, grain integrity, water absorption, swelling rate, iodine blue value, solid content, microscopic changes of grain morphology, volatile components, protein, fat, starch and trace nutrients in grains. There are single and compound effects of various climatic factors on the quality of cereals, but the regulation mechanism of the compound interaction

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-B9); 吕梁市重点研发项目(2021NYGG-2-92); 山西省现代农业产业技术体系(GZTX202220)

Supported by: National Modern Agricultural Industrial Technology System of Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (No.CARS-06-14.5-B9); Key Research and Development Project of Lvliang City (No.2021NYGG-2-92); Shanxi Modern Agricultural Industrial Technology System (No.GZTX202220)

作者简介: 岳忠孝, 女, 1992年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为农产品加工及综合利用。E-mail: 534265957@qq.com.

通讯作者: 冯耐红, 女, 1973年出生, 硕士, 研究员, 研究方向为农产品加工及综合利用。E-mail: fnaihong@126.com.

of various climatic factors still needs to be further studied.

Key words: climate factors; cereals; appearance quality; cooking quality; taste quality; nutritional quality

随着当前全球气候变暖, 极端气候频发, 能够提供足够的人类营养需求和确保充足的能源供应, 成为了当今人类面临的巨大挑战^[1-2]。IPCC 在日内瓦发布《气候变化与土地特别报告》中指出, 极端气候的出现可能会导致强降水产生, 引起洪水泛滥及海平面上升, 极端高温天气增加引起干旱频发等现象出现, 进而加剧荒漠化以及土地退化等一系列负面连锁反应的发生, 威胁着人类的生态环境。近几十年气候环境的变化已经致使气候带偏移^[3-4], 导致极端气候事件增加, 对区域生态系统造成了不利影响, 减缓生物多样性形成, 对农作物的生长繁殖也产生不可逆的作用。二十世纪中叶, 气候变化将对全球近 1/5 的谷物种植区造成消极影响^[5], 全球气候年际变化造成了粮食安全问题, 气候条件因子不良变化也影响着谷物生产的产量与品质^[6], 同时由于农业生态系统(地理-土壤-气候-植物)的复杂多变特性, 对农业生产有消极影响^[7]。

在作物整个生育期中, 谷物品质特性受诸如品种遗传特性、生态因子、水肥栽培措施、病虫害防治等多因素影响, 其中环境气候因子是影响谷物产量和品质决定性因素之一, 作物适生地的气候条件变化对谷物品质有制约性, 不同生态区不同年际的同品种谷物的品质特性及抗逆能力也有一定差异, 前人以“晋谷 21”的商品属性为研究对象, 以山西省 12 个不同谷子产区的气候因子为变量, 研究了生态因子与商品品质属性的关系, 显示气候因子对谷物品质的影响大于土壤因素且在生育早期和中期尤为明显, 平均温度与湿度对谷子的 b^* (黄蓝值)、TFC(总黄酮含量)、CS(回复值)和 PTM(糊化温度)有正向影响, 对 L/b(长宽比)和 BD(崩解值)有负向影响, 表明其外观品质、蒸煮食味品质都存在显著差异^[8]。农作物的“质”与“量”与农户收入与国民经济有密切关系, 因此探讨气候因子与谷物商品品质是时代发展的方向与需求。

多种研究表明气候因子对谷物的颜色光泽、

粒径大小、谷粒完整度、对谷物蒸煮过程中的吸水率、膨胀率、碘蓝值、固形物含量、籽粒形态微观变化、谷物中挥发性成分、谷物中蛋白质、脂肪、淀粉、微量营养元素等均产生不同程度的影响。本文将从外观、蒸煮、食味、营养品质等方面, 总结气候因子的改变对谷物品质特性影响的进展, 并对该领域未来的研究进行展望。

1 谷物与气候

1.1 谷物的概述

谷物作物, 包括小麦、水稻、玉米、豆类、杂粮杂豆类等作物, 是谷类植物的总称, 谷类作物产量高、涵盖范围广, 是各国人民的传统主食, 同时也是人类和牲畜食物能量的主要供应者。谷类作物在我国可划分为三类, 分别为禾谷类、豆类、薯类; 其中产量最高排名前三的是小麦(*Triticum aestivum* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)和玉米(*Zea mays* L.)^[9], 是我们每天热量的主要来源。然而, 近年来随着全球变暖加剧, 主要谷物作物的生产受到气候不断变化的威胁, 粮食的产量和品质均受到不同程度的挑战。

1.2 谷物品质

谷物的品质特性是影响消费者购买欲望的重要原因, 一般包括外观品质、蒸煮品质、营养品质、食味品质; 外界的环境因素如: 土壤因素、气候因素、地理因素不仅会影响谷物产量, 还会显著影响谷物的品质特性。经研究发现, 在全球范围内, 相比于其他作物, 玉米是最易受气候变异影响而歉收的一种谷物, 玉米产量年际波动中有 18%是气候变异的结果, 气候因素会影响植物体内的生物化学过程, 在整个生育期, 尤其是灌浆期会直接影响植物的代谢过程和相应的生理机能, 决定谷物形成反应的速度和强度, 影响籽粒的化学构成和组分含量, 从而影响谷物籽粒的品质^[10]。

在功能农业大背景下, 人们更加追求优质、绿色的谷物产品, 高品质的谷物与适生地的气候

条件息息相关,农作物生产品质潜力与气候因子显著相关^[11]。如气候因子对稻米品质的影响通常表现在水稻灌浆时期的动态变化,太阳辐射总量、温度、日照时数、降雨量等均会影响谷物细胞发育等生理生化过程^[12]。

1.3 气候因子对谷物的影响

现今全球气候变暖,气候因子在一定程度上严重制约着农业生产,尤其是极端气候出现会影响农作物生态稳定性,不利于谷物的高产高效、优质稳产。辐射、积温、日较差、降雨量及分布、气体浓度比例等气候因子均不同程度影响谷物的生长环境因素,气候因子的变化直接或间接显著地影响谷物的品质特性。如水分亏盈导致的旱胁迫或涝胁迫会影响谷物根部的氧气微环境,进而影响根系的形态与伸长,根系感知土壤水势后又通过对碳水化合物的分配影响地上部分的生长发育^[13];温度高低影响谷物的生育期变化,改变谷物正常的光合作用和蒸腾能力,还可能增加病虫害发生几率;我国北方温度低容易造成谷物霜冻,尤其在灌浆期遇冷害会导致谷物内部的离子稳态紊乱,使得籽粒干瘪,造成严重减产,谷物品质受损^[14];大气中气体浓度比例变化对谷物中营养元素、矿质微量元素的含量有显著影响^[15]。明确气候因子对谷物品质的影响,有助于我们更好地通过育种和栽培技术调控应对气候变化对谷物品质的影响,进而保证国家粮食安全。

2 谷物品质对气候因子的响应

2.1 谷物外观品质对气候因子的响应

气候因素会对谷物的颜色、光泽、粒径大小、谷粒完整度等产生影响。在谷物的灌浆结实期和成熟期,外界气温若产生高低变化,其灌浆速度及籽粒充实率会相应加快或减缓,影响所形成复合淀粉粒积累形成的排列结构的紧密疏松程度与结构空隙度,导致淀粉数目的变化^[16],引起光线透过谷物的折射变化进而导致籽粒透光率的增减,引起谷物外观品质变化。

为更好解析气象因子对谷物品质特性的影响,程晓雨^[17]等基于十九年的气象数据,运用 ARDL 模型实证分析了气候变化对中国谷物生产

的长期影响,解释了 CO₂ 排放、平均温度和温差在长期内对谷物生产有显著的消极影响,而能源消耗、平均降雨量、劳动力和耕地面积在长期内对谷类作物的生产具有显著的正向影响,降雨变异性对谷物生产没有显著影响。小米被认为是主要的气候适应型作物^[18],如珍珠粟属于气候智能型“小型”谷类作物,对于研究最大程度减少气候变化的不利影响有重要意义,不仅有可能增加干旱地区农业收入和粮食安全,而且可作为耐受气候变化诱导的非生物胁迫的新基因、等位基因的宝贵来源^[19]。谷物籽粒透明度是指在电光透视下籽粒的折光率或晶亮程度,殷延勃研究发现降雨量和日平均气温差对水稻的垩白面积具有正向作用;而降雨量和日平均最高气温对水稻籽粒透明度具有正向作用^[20]。气象环境因素对水稻白垩性状影响较大,尤其是灌浆期的温度变化,对起始灌浆势、平均灌浆速率、最大灌浆速率、灌浆持续时间等指标都产生不同程度的影响^[21]。稻米白垩变化、灌浆期温度变化等和日均温存在线性延续及拐点关系^[22],不同品种的谷物对光温的敏感性也有差异,这可能与谷物生长的生态环境和本身的遗传特性有关。臭氧浓度高的气候环境因子会造成水稻的外观品质有变劣趋势^[23];高温使稻米整精米率下降及垩白增加^[24],这可能与谷物灌浆期的气孔开关和冠层温度有关^[25]。

温光条件在整个生育期对谷物外观品质的形成会有一定影响。光照是光合作用的主要能源,光照时长与光质强弱因素影响谷物生长的整个生育期,尤其在灌浆结实期,若光照不足,导致光合作用受阻,造成营养生长过旺、田间郁闭、密不透光等,进而影响谷物生理生态的动态变化,如光合关键酶与限速酶的活性变化规律,进而降低谷物的外观品质。

2.2 谷物蒸煮品质对气候因子的响应

谷物蒸煮品质与籽粒内的淀粉、蛋白质等物质含量及结构形态密切相关。气温日较差、积温、光照以及降水量等作为影响植物生长的关键因子,对植物籽粒内的物质合成起着重要作用。不同的生态区由于气候因子差异,种植的同一种也会表现不同的蒸煮品质。淀粉含量与结构的差

异会对谷物蒸煮过程中的吸水率、膨胀率、碘蓝值、固形物含量、籽粒形态微观变化等产生不同的影响。研究发现,我国北方地区小麦全生育期的日照总时数高于南方,籽粒的蛋白质含量也高,说明小麦蛋白质的积累对长日照较为敏感^[26]。环境温度也是影响谷物品质的因子,马珂^[8]等研究发现较高的日平均温度有利于小米蒸煮食用品质的形成;二氧化碳浓度等气体因子对谷物淀粉含量的响应有正向、负向、无变化等不同程度的影响,变化趋势可通过快速粘度分析仪(RVA)谱特征值的变化趋势体现^[27],蒸煮食味品质变差主要体现为衰减值(BD)减小、回复值(CS)增加^[28];Li等研究发现光辐射强度、温度及湿度会显著影响稻米的碾磨品质及蒸煮质量^[29]。

气象因子对谷物蒸煮品质的影响通常是通过干物质累积量的变化而产生作用的。谷物在蒸煮过程中,淀粉与蛋白质等大分子物质的结构变化均与谷物灌浆结实期的生理生化代谢基础存在着显著或极显著的关系,气候各因子在发挥效应时可能存在互作效应。有研究认为,光强对谷物籽粒灌浆的影响表现为高光强和低温组合时,对谷物粒重和籽粒完整度的影响最大^[30]。

2.3 谷物食味品质对气候因子的响应

食味品质也是评价谷物品质特性的重要指标。气候因子会影响谷物籽粒中淀粉和蛋白质积累,影响风味成分的合成和降解,改变挥发性物质成分的组成与气味,对其食味品质产生正向或者负向的影响。气候因素也可以改变谷物的加工品质,如在谷物籽粒形成期,气温会影响产品的烘烤特性;光热因子会影响灌浆结实期的谷物粗加工品质,如在水稻中突出表现为高温导致糙米率、整精米率的下降^[31]。

在气候因素中,降雨量对谷物食味品质影响程度较大,如降水量与小麦蛋白质含量呈负相关,我国北方生态区降雨量少于南方生态区,因而北方小麦蛋白质含量反而高于南方^[32],可能与小麦形成代谢过程中的一些酶有关。对于高粱和糜子等旱作谷物来说,在其生长生殖尤其是收获期间,如果降雨过量或灌溉过多等造成水分过剩,风味氨基酸含量降低,往往会导致籽粒口感风味下降,

也对后续的脱粒干燥加工产生不利影响^[33]。与降水因子相比,温度和气体浓度比例对高粱的口感食味品质影响更为显著,这与籽粒形成过程中的糖分、单宁、鞣酸、油脂等含量有关^[34-35]。Jing等^[36]在2015—2016年使用粳稻品种进行了田间实验,变量为大气中CO₂的富集浓度,研究发现高浓度CO₂显著提高了可溶性淀粉合成酶和颗粒结合淀粉合成酶的活性,分别提高了28.0%和27.9%,从而增加了淀粉颗粒的长链和体积,而降低了淀粉分支酶活性的7.5%,这可能是通过乙烯信号途径(高浓度CO₂显著降低谷物中乙烯释放速率28.8%),导致淀粉分子中 α -1,6糖苷键显著减少,碘结合能力和双螺旋结构显著增加。高浓度CO₂诱导淀粉颗粒形态和精细结构的变化,二者协同改变了水稻的热性质,并最终改善了米饭的食味品质。这些发现对稻米的适口性和淀粉工业在未来环境中的适应性策略的发展具有重要意义。

2.4 谷物营养品质对气候因子的响应

谷物中的营养组分、矿质元素、功能活性物质成分等均对温度模式、降水变化、气体浓度比例等气候因子有着不同程度的响应。张艾英等^[37]研究发现,气候因素在小米适口性方面起了关键作用,相比较而言,土壤因素主要影响了小米中各种矿物元素的积累。因此,研究谷物品质对气候因素和土壤因素的响应,揭示其品质变化规律,不仅可为栽培合理布局提供理论支撑,而且可在育种方面提供技术指导。赵慧琴等^[38]研究了小米“沁州黄”品质对气象因素的响应,得出光照强弱和昼夜温差会影响谷物营养物质的合成转运,高温利于功能物质的积累,进而对谷物品质产生较大影响。成林等^[39]通过分析测定287份小麦样品的品质,揭示了不同生育期影响小麦筋度及蛋白含量的关键气象因子存在差异,分别为:拔节—抽穗期为平均最高气温、空气相对湿度和日照时数,开花—灌浆期为空气相对湿度,以及成熟—收获期为平均气温,研究明确了影响河南省强筋小麦营养品质最重要的气象因子为气温。温度变化影响谷物籽粒对矿质元素的吸收,尤其是对氮吸收量的影响较大,改变其碳氮通量比;高温还会

增加谷物中的抗氧化活性成分（如花青素、黄酮醇等）含量^[40]；而降水量与谷物中矿质元素的浓度及氨基酸浓度呈负相关^[41]，同时也会通过影响谷物的呼吸作用而增加对碳水化合物的消耗；Graziano 等^[42]在研究过程中发现，降雨过多或者过量灌溉会显著降低灌浆期小麦的面筋蛋白含量。气候因子之间也会产生协同作用，高温且缺水环境会改变谷物蒸腾作用，影响水溶性营养成分的吸收转运及利用效率；景立权等^[43]研究得出高 CO₂ 浓度或高温环境下生长的水稻表现出垩白增加、碎米增多的趋势，高 CO₂ 浓度导致稻米蛋白质和多种元素含量下降；一般来说，高浓度 CO₂ 环境气候因子条件下，水稻中营养元素含量降低，白垩也增加导致其可加工程度下降^[44]，CO₂/O₂ 比例升高会造成稻米成分中有益身体的微量矿质元素含量的下降^[45]，高浓度二氧化碳气候因子下，稻米中的清蛋白、谷蛋白、球蛋白、醇溶蛋白等含量下降，而氨基酸组成与相对含量的平衡未产生变化^[46]；氧分压少的气候因子会导致谷物中矿质元素和维生素含量一致下降，降幅较高^[47]，即可得出高浓度的 CO₂ 可能对谷物类作物的品质产生消极影响，此结论与高浓度的 CO₂ 在果蔬类中的效应相反^[48]。

3 展望

现阶段全球粮食供应变得多样化，农业生产能力也得到了提高，谷物营养品质适应气候变化的挑战，就需要一些新品种、新技术、新方法的介入，比如利用基因组技术等新方法，加快作物遗传育种的速度，缩短育种周期，降低育种成本，同时还能够改善作物的性状，进而适应气候变化和提高谷物的营养价值。如新品种珍珠粟是一种气候智能型作物，营养丰富，对极端气候的抗逆能力也较强；如作物野生亲缘（crop wild relatives, CWRs）和上游 cDNA 片段（upstream cDNA segments, UCSs）促进基因库多样化，这些物种已被确定为与营养相关的新性状的来源^[49]。

在气候变化加剧的大环境中，开发能够适应气候变化且保持高生产力的作物品种，利用不同的组学方法开发营养密集、气候适应潜力强的品种；充分利用可以改变挖掘调控关键农艺性状基

因的组学等先进技术；实现农业系统多元化，为人类提供足够的食物，保障营养需求和能源供应。

随着目前很多高新科技的迅速发展，如：高通量基因组测序、作物表型、基因转移技术、数量性状基因（QTL）定位、全基因组关联分析（GWAS）、CRISPR-Cas9 基因编辑等，皆为适应气候变化的谷物基因工程研究提供了新的方法手段^[50]，更利于有针对性地寻找新的目的基因，进而在提升农作物气候适应性、改善农艺性状、培育抗逆能力强、改良营养品质的作物新品种等方面做出贡献。

谷物生育期的气候因子会单独或者复合地对其品质特性产生影响，生态因素对谷物品质影响是复杂的，气候变化因子与地理因子、土壤因子等其他环境和栽培农艺条件也存在着互作机制。目前的研究发现谷物品质形成过程的交互影响还受人为管理措施的影响，我国近几年也形成了系统的谷物气候品质认证等级评价模型，用于关联筛选谷物品质分级的关键气候指标，但关于气候因子与谷物品质影响的机理机制尚不明晰，谷物品质特性的变化可以通过系统的多因子互作分析，才能定位有效地栽培调控措施，进而减缓气候变化对谷物品质特性的负面影响。

参考文献：

- [1] SCHEBEN A, YUAN Y, EDWARDS D. Advances in genomics for adapting crops to climate change[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2016, 6, 2-10.
- [2] HUNTER D, BORELLI T, BELTRAME D M, et al. The potential of neglected and underutilized species for improving diets and nutrition[J]. *Planta*, 2019, 250, 709-729.
- [3] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007(8): 1877-1885.
XIAO G J, ZHANG Q, WANG J. Research progress on the impact of global climate change on agricultural ecosystem[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007(8): 1877-1885.
- [4] 崔晓军, 王一飞, 吴明亮, 等. 气候变化研究中“气候平均值”等术语标准化问题探析[J]. *标准科学*, 2022(10): 80-88.
CUI X J, WANG Y F, WU M L, et al. Analysis on standardization of terms such as "climate average" in climate change research[J]. *Standard Science*, 2022(10): 80-88.
- [5] CAMPBELL B, MANN W, MELENDER R. Addressing agriculture in climate change negotiations: A scoping report[R]. Washington: Meridian Institute, 2011.

- [6] ZANDALINAS S, BALFAGON D, GOMEZ A, et al. Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses[J]. *J Exp Bot*, 2022, 73(11): 3339-3354.
- [7] TAO F, YOKOZAWA M, ZHANG Z. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process based model development, optimization and uncertainties analysis[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149(5): 831-850.
- [8] MA K, ZHAO L R, ZHAO X T. The relationship between ecological factors and commercial quality of high-quality foxtail millet "Jingu 21"[J]. *Food Res Int*, 2023, 163: 112225.
- [9] SHIFERAW B, PRASANNA B M, HELLIN J, et al. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security[J]. *Food Security*, 2011, 3, 307-327.
- [10] 黄磊, 王长科, 巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(1): 1-8.
- HUANG L, WANG C K, CHAO Q C. Interpretation of IPCC special report on climate change and land[J]. *Research Progress on Climate Change*, 2020, 16(1): 1-8.
- [11] SAPIRSTEIN H D, DAVID P, PRESTON K R, et al. Durum wheat breadmaking quality: Effects of gluten strength, protein composition, semolina particle size and fermentation time[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(2): 150-161.
- [12] 张皓, 翁玲, 刘宇鹏, 等. 气象因子与黔中水稻灌浆速度及千粒重相关性分析[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(12): 1-8.
- ZHANG H, WENG L, LIU Y P, et al. Correlation analysis of meteorological factors with grain filling speed and 1000-grain weight of rice in central Guizhou[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2019, 46(12): 1-8.
- [13] YAN J, ZHANG N, KANG F, et al. Cultivar replacement increases water use efficiency in foxtail millet in Shanxi Province, China[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2021(164): 73-81.
- [14] DONG Q, DANG T, GUO S, et al. Effects of mulching measures on soil moisture and N leaching potential in a spring maize planting system in the southern Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 803-808.
- [15] COLOMBO S M, RODGERS T F M, DIAMOND M L, et al. Projected declines in global DHA availability for human consumption as a result of global warming[J]. *Ambio*, 2020, 49(4): 1-16.
- [16] NADEAU C P, URBAN M C, BRIDLE J R. Coarse climate change projections for species living in a fine-scaled world[J]. *Glob Chang Biol*, 2017, 23(1): 12-24.
- [17] 程晓雨. 基于 ARDL 模型浅析气候变化对中国谷物生产的长期影响[J]. *粮食问题研究*, 2022(6): 26-30.
- CHENG X Y. Analysis of the long-term impact of climate change on grain production in China based on ARDL model[J]. *Research on Grain Issues*, 2022(6): 26-30.
- [18] GORON T L, RAIZADA M N. Genetic diversity and genomic resources available for the small millet crops to accelerate a New Green Revolution[J]. *Front. Plant Sci*, 2015, 6, 157.
- [19] SRIVASTAVA R K, SINGH R B, PUJARULA V L, et al. Genome-wide association studies and genomic selection in pearl millet: advances and prospects[J]. *Front. Genet*, 2020, 10, 1389-1395.
- [20] 殷延勃, 朱美静, 马洪文, 等. 环境因子对宁夏水稻品质性状的影响——水稻主要品质性状对环境因子的逐步回归分析[J]. *宁夏农林科技*, 2002(2): 17-19.
- YIN Y B, ZHU M J, MA H W, et al. Effects of environmental factors on rice quality traits in Ningxia-stepwise regression analysis of main rice quality traits on environmental factors[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2002(2): 17-19.
- [21] 曾志勇. 气候变化对水稻生产影响的研究综述[J]. *东北农业科学*, 2021, 46(1): 89-93.
- ZENG Z Y. Review of research on the impact of climate change on rice production[J]. *Northeast Agricultural Sciences*, 2021, 46(1): 89-93.
- [22] 荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳, 等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 179-184.
- JING R Y, WEI J Q, WANG L Y, et al. Comprehensive evaluation of quality of different rice varieties based on principal component analysis[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 179-184.
- [23] 付晓, 尚博, 张国友, 等. 不同生育期臭氧熏蒸对水稻光合作用及生长的影响差异[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(10): 2066-2075.
- FU R, SHANG B, ZHANG G Y, et al. Effects of ozone fumigation at different growth stages on photosynthesis and growth of rice[J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2021, 40(10): 2066-2075.
- [24] 蒙秀菲, 伍祥, 曾涛, 等. 温度对稻米品质影响的研究[J]. *山地农业生物学报*, 2022, 41(4): 83-87.
- MENG X F, WU X, ZENG T, et al. Study on the effect of temperature on rice quality[J]. *Journal of mountain agriculture and biology*, 2022, 41(4): 83-87.
- [25] ZHANG G Y, SA H, USUI Y, et al. Grain growth of different rice cultivars under elevated CO₂ concentrations affects yield and quality[J]. *Field Crops Research*, 2015, 179: 72-80.
- [26] 杨晓婉, 朱志明, 马自清, 等. 小麦品质影响因子研究进展[J]. *耕作与栽培*, 2019(5): 30-38.
- YANG X W, ZHU Z M, MA Z Q, et al. Research progress of influencing factors of wheat quality[J]. *Tillage and cultivation*, 2019(5): 30-38.
- [27] JING L Q, WU Y Z, ZHUANG S T, et al. Effects of CO₂ enrichment and spikelet removal on rice quality under open-air field conditions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(9): 2012-2022.
- [28] 刘立军, 常二华, 熊溢伟, 等. 水稻根系分泌物有机酸、多胺与稻米蒸煮品质及蛋白质组分的关系[J]. *扬州大学学报(农业*

- 与生命科学), 2014, 35(3): 48-53.
- LIU L J, CHANG E H, XIONG Y W, et al. Relationship between organic acids and polyamines in rice root exudates, cooking quality and protein components of rice[J]. Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2014, 35(3): 48-53.
- [29] LI X, WU L, GENG X, et al. Deciphering the environmental impacts on rice quality for different rice cultivated areas[J]. Rice (N Y), 2018, 19, 11(1): 7.
- [30] 李志华, 朱凯, 柯福来. 高粱种子胚乳完整程度对芽苗建成的影响[J]. 辽宁农业科学, 2021(1): 77-78.
- LI Z H, ZHU K, KE F L. Effect of endosperm integrity of sorghum seeds on seedling establishment[J]. Liaoning Agricultural Science, 2021(1): 77-78.
- [31] BEN M S, SOBA D, ZHOU B, et al. Climate change, crop yields, and grain quality of C₃ cereals: a meta-analysis of [CO₂], temperature, and drought effects[J]. Plants (Basel), 2021, 24, 10(6): 1052.
- [32] 冯国柱, 屈玉国, 杨玉强. 主要气候因素与小麦品质的关系[J]. 中国种业, 2004(2): 54-55.
- FENG G Z, QU Y G, YANG Y Q. Relationship between main climatic factors and wheat quality[J]. China Seed Industry, 2004 (2): 54-55.
- [33] ESHAM M, JACOBS B, ROSAIRO H, et al. Climate change and food security: A Sri Lankan perspective[J]. Environment Development & Sustainability, 2018, 20(3): 1-20.
- [34] MORETTI C L, MATTOS L M, CALBO A G, et al. Climate changes and potential impacts on postharvest quality of fruit and vegetable crops: A review[J]. Food Research International, 2010, 43(7): 1824-1832.
- [35] BALTER K. The importance of considering both nutrient quality and climate impact to support sustainable development[J]. Am J Clin Nutr, 2021, 114(2): 412-413.
- [36] JING L, CHEN C, LU Q, et al. How do elevated atmosphere CO₂ and temperature alter the physiochemical properties of starch granules and rice taste?[J]. Science of the Total Environment, 2021, 766(1): 1-11.
- [37] 张艾英, 郭二虎, 刁现民, 等. 不同气候和土壤对小米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3218-3231.
- ZHANG A Y, GUO E H, DIAO X M, et al. Effects of different climate and soil on millet quality[J]. China Agricultural Science, 2019, 52(18): 3218-3231.
- [38] 赵慧琴. 气象因素对“沁州黄”小米生产的影响及栽培中的对策[J]. 山西气象, 2005(2): 18-19.
- ZHAO H Q. Influence of meteorological factors on the production of “Qinzhou Yellow” millet and countermeasures in cultivation[J]. Shanxi Meteorology, 2005(2): 18-19.
- [39] 成林, 申晓晴, 韩耀杰, 等. 河南强筋小麦种植品质达标的关键气象因子分析[J]. 中国农业气象, 2023, 44(1): 47-57.
- CHENG L, SHEN X Q, HAN Y J, et al. Analysis on the key meteorological factors of reaching the planting quality standard of strong gluten wheat in Henan[J]. Agrometeorology of China, 2023, 44(1): 47-57.
- [40] MOLMANN J A B, STEINDAL A, BENGTTSSON G B, et al. Effects of temperature and photoperiod on sensory quality and contents of glucosinolates, flavonols and vitamin C in broccoli florets[J]. Food Chemistry, 2015, 172(1): 47-55.
- [41] HOEGY P, POLL C, MARHAN S, et al. Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1470-1477.
- [42] GRAZIANO S, MARANDO S, PRANDI B, et al. Technological quality and nutritional value of two durum wheat varieties depend on both genetic and environmental factors[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(8): 2384-2395.
- [43] 景立权, 户少武, 穆海蓉, 等. 大气环境变化导致水稻品质总体变劣[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2462-2475.
- JING L Q, HU S W, MU H R, et al. Changes in atmospheric environment lead to overall deterioration of rice quality[J]. China Agricultural Sciences, 2018, 51(13): 2462-2475.
- [44] 谢立勇, 林而达, 孙芳, 等. 全生育期二氧化碳与温度处理对水稻生理性状的影响初报[J]. 中国农业大学学报, 2006(1): 17-21.
- XIE L Y, LIN E D, SUN F, et al. Preliminary report on the effects of carbon dioxide and temperature treatment on physiological characteristics of rice in the whole growth period[J]. Journal of China Agricultural University, 2006(1): 17-21.
- [45] GUPTA K, KUMAR R, BARUAH K, et al. Greenhouse gas emission from rice fields: a review from Indian context[J]. Environmental science and pollution research international. 2021, 28(24): 30551-30572.
- [46] WANG Y X, SONG Q L, MICHAEL F, et al. Effects of elevated ozone, carbon dioxide, and the combination of both on the grain quality of Chinese hybrid rice[J]. Environmental Pollution, 2014, 189: 9-17.
- [47] ZHU C W, KOBAYASHI K, LOLADZE I, et al. Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice dependent countries[J]. Science Advances, 2018, 4(5): 1012-1018.
- [48] GIRI A, ARMSTRONG B, RAJASHEKAR C B. Elevated carbon dioxide level suppresses nutritional quality of lettuce and spinach[J]. American Journal of Plant Sciences, 2016, 7(1): 246-258.
- [49] BROZYNSKA M, FURTADO A, HENRY R J. Genomics of crop wild relatives: Expanding the gene pool for crop improvement[J]. Plant Biotechnol. J., 2016, 14: 1070-1085.
- [50] GAO C. Genome engineering for crop improvement and future agriculture[J]. Cell, 2021, 18, 184(6): 1621-1635. ㉞