

土壤肥力对不同粒色小麦籽粒抗氧化能力的影响

董飞¹,张贤²,张敏敏^{1,3},贾亚琴¹,申艳婷¹,李峰¹,闫双堆³,闫秋艳^{1,3}

(1. 山西农业大学小麦研究所,山西临汾 041000; 2. 临汾职业技术学院,山西临汾 041000;

3. 山西农业大学资源环境学院,山西太谷 030801)

摘要:为探讨不同粒色小麦在不同肥力土壤下籽粒抗氧化能力差异,选取5个黑粒、2个蓝粒及1个白粒小麦品种(系)为材料,设置高、低两个肥力土壤,分析小麦籽粒花色苷、总酚及类黄酮的含量,并通过测定铁离子还原能力(FRAP值)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH·)自由基清除率、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS⁺·)自由基清除率以及羟基(·OH)自由基清除率等评价籽粒抗氧化能力。结果表明,低肥力土壤有利于籽粒花色苷积累,其含量较高肥力土壤增加33.20%~73.57%,其中蓝粒小麦含量较高,黑粒小麦次之,白粒小麦最低;籽粒总酚和类黄酮含量较高肥力土壤分别下降4.12%~56.46%和1.14%~25.87%;肥力、品种、肥力×品种对花色苷、总酚和类黄酮含量均具有显著影响。高肥力土壤籽粒FRAP值和ABTS⁺·清除率均高于低肥力土壤,而DPPH·和·OH清除率总体表现为低肥力土壤高于高肥力土壤;土壤全氮和有机质含量是抗氧化能力的主要调控因子;肥力、品种、肥力×品种对FRAP值及ABTS⁺·、DPPH·和·OH清除率均具有显著影响。高低肥力土壤综合得分大小均表现为黑粒小麦>蓝粒小麦>白粒小麦;高肥力土壤平均得分高于低肥力土壤。综上,高肥力土壤较低肥力土壤种植的小麦具有较高的抗氧化能力,其中黑粒小麦的抗氧化能力高于蓝粒和白粒小麦。

关键词:不同粒色小麦;抗氧化物质;自由基清除率;土壤有机质;土壤全氮

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)08-1061-09

Effect of Soil Fertility on the Antioxidant Capacity of Wheat Grains with Different Grain Colors

DONG Fei¹, ZHANG Xian², ZHANG Minmin^{1,3}, JIA Yaqin¹, SHEN Yanting¹,
LI Feng¹, YAN Shuangdui³, YAN Qiuyan^{1,3}

(1. Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen, Shanxi 041000, China; 2. Linfen Vocational and Technical College, Linfen, Shanxi 041000, China; 3. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: In order to investigate the differences in antioxidant capacity of wheat grains with different grain colors under high and low soil fertility conditions, five black-grained wheat, two blue-grained wheat and one white-grained wheat variety(lines) were selected to determine the contents of anthocyanins, total phenols and flavonoids in grains. The antioxidant capacity of the grains was evaluated by measuring the ferric ion reducing antioxidant potential (FRAP value), 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine (DPPH·) radical scavenging rate, 2,2-azino-bis(3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS⁺·) radical scavenging rate, and hydroxyl (·OH) radical scavenging rate. The results showed that low fertility soil was conducive to the accumulation of anthocyanins in grains, and the anthocyanin content were increased by 33.20%–73.57% compared to those in high fertility soil. Among

收稿日期:2024-05-10 修回日期:2024-08-07

基金项目:临汾市科技重点研发计划项目(2343);山西省高等学校科技创新项目(2022L102);运城科技计划项目(YCKJ-2023069);山西农业大学生物育种工程项目(YZGC015)

第一作者 E-mail: yqyadf@163.com(董飞); 1226840468@qq.com(张贤)

通讯作者 E-mail: sxnkyqy@163.com(闫秋艳)

them, blue-grained wheat had a higher content, followed by black-grained wheat, and white-grained wheat had the lowest content; The content of total phenols and flavonoids in grains was decreased by 4.12%—56.46% and 1.14%—25.87%, respectively. Fertility, variety, and fertility \times variety had significant effects on the content of anthocyanins, total phenols, and flavonoids. The FRAP value and ABTS⁺• clearance rate of grains in high fertility soils were higher than those in low fertility soils, while the overall DPPH and •OH clearance rates were higher in low fertility soils than in high fertility soils. The total nitrogen and organic matter content in soil were the main regulatory factors of antioxidant capacity. Fertility, variety, and fertility \times variety had significant effects on FRAP values and ABTS⁺•, DPPH, and •OH clearance rates. The comprehensive score of high and low fertility soil ranked as black-grained wheat > blue-grained wheat > white-grained wheat. The average score of high fertility soil was higher than that of low fertility soil. In summary, wheat grown in high fertility soil has higher antioxidant capacity than that in low fertility soil, with black-grained wheat was higher than blue- and white-grained wheat.

Keywords: Different colored-grain wheat; Antioxidant substance; Free radical scavenging rate; Soil organic matter; Soil total nitrogen

特殊粒色小麦是指因种皮或糊粉层中含有丰富的天然花色苷类化合物,使籽粒呈现黑色、紫色、蓝色、绿色、红色等的小麦品种,亦称之为彩色小麦。彩色小麦籽粒富含多酚、类黄酮、类胡萝卜素、花青素等抗氧化物质,其中酚类抗氧化物质本身可释放出氢离子,使过氧化物转化或分解为对人体无害的低分子。此外,花青素具有抗氧化能力,在改善睡眠、修复记忆损伤、缓解近视、防癌变、抗衰老、预防心血管疾病、降血脂等方面具有重要的医疗价值^[1-3]。研究表明,黑、蓝粒小麦籽粒的抗氧化能力均高于白粒小麦,且籽粒色素含量、总黄酮含量与抗氧化能力指标间显著相关^[4]。彩色小麦独特的营养功能特性使其受到广泛关注。

植物中的抗氧化物质受环境因子影响较大,如海拔、光照条件、紫外线、CO₂、土壤肥力及水分等^[5-7]。其中,土壤肥力对小麦籽粒的抗氧化特性的影响尤为显著。研究发现,低氮条件有利于作物籽粒中酚类^[8]、酚酸^[9]及花色苷^[10-11]的积累,尤其对彩色小麦抗氧化物质的调控作用较为明显^[12]。但是,也有的抗氧化物质如总酚含量随施氮量的增加而增加^[13-14]。因此,土壤肥力与彩色小麦籽粒抗氧化物质间的关联性仍需进一步量化关系。抗氧化能力是衡量籽粒受到外界环境干扰的重要指标^[15],目前作物抗氧化能力的评价主要基于自由基清除能力的测定,其中 DPPH 法和 ABTS 法使用较广泛^[5]。

目前,关于肥力对小麦籽粒抗氧化能力的影

响研究较少。本研究通过分析不同粒色小麦品种(系)在高低肥力土壤条件下籽粒的抗氧化物质及抗氧化能力的响应特征,探讨土壤肥力因子(如土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾)与抗氧化指标之间的关系,以期为提高彩色小麦籽粒抗氧化水平、优化施肥管理措施提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于山西省临汾市尧都区吴村镇洪堡村山西农业大学小麦研究所洪堡试验基地(36°19'N, 111°49'E, 481m a. s. l.)进行。试验地为石灰性褐土,根据全国第二次土壤普查制定的土壤肥力分级标准^[15],选择高肥力土壤(有机质 37.56 g · kg⁻¹、全氮 1.02 g · kg⁻¹、有效磷 12.18 mg · kg⁻¹、速效钾 139.32 mg · kg⁻¹)和低肥力土壤(有机质 18.88 g · kg⁻¹、全氮 0.65 g · kg⁻¹、有效磷 19.68 mg · kg⁻¹、速效钾 146.95 mg · kg⁻¹)两种地块(分别用 HF 和 LF 表示),分别种植 8 个小麦品种(系)。小麦品种(系)为运糯 32(白粒)、临黑 158(黑粒)、临黑 199(黑粒)、运黑 1619(黑粒)、晋紫麦 31(黑粒)、冬黑 1608(黑粒)、运黑 14207(蓝粒)及运黑 9921(蓝粒),由山西农业大学小麦研究所和棉花研究所提供。试验采用随机区组设计,设 3 次重复,小区面积为 0.67 m²(3.0 m \times 22.3 m)。于 2021 年 10 月播种,播种前撒施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=22:16:10)750 kg · hm⁻²,并进行旋耕整地,小麦播种量为 225 kg · hm⁻²,生

育期分别浇越冬水(12月5日)和拔节水(3月13日),于2022年6月收获,田间其他管理方式与当地高产田一致。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 小麦籽粒提取液制备

采用60%酸化乙醇溶液(pH=3)作为提取溶剂,通过超声辅助提取法提取小麦籽粒中的活性成分。于小麦成熟期每小区采集面积约1 m²的麦穗,脱粒晾干后粉碎。取1.0 g小麦粉,加入50 mL的60%酸化乙醇(pH=3)震荡30 min,于40℃下超声处理(超声功率100 W)1 h,之后在8 000 r·min⁻¹条件下离心20 min,取上清液作为提取液备用。

1.2.2 花色苷含量测定

基于单一pH法并优化改进测定花色苷含量。在2.0 mL提取液中加入8 mL KCl-HCl的缓冲液(pH=1.0),在5 000 r·min⁻¹的转速离心20 min,用分光光度计测量530 nm波长下吸光度值。基于花色苷的提取工艺,参照时玉晴^[16]等的计算方法,将花色苷含量转换成矢车菊-3-葡萄糖苷计算单位样品中花色苷含量,花青素含量计算公式如下^[16]:

$$C = \frac{A \times V \times n \times M}{\epsilon \times m} \times 1\,000$$

式中,C为花青素含量(mg·kg⁻¹);A为花色苷吸光度值;V为提取液总体积(mL);n为稀释倍数;M为矢车菊-3-葡萄糖苷相对分子量(449 g·mol⁻¹);ε为矢车菊-3-葡萄糖苷的消光系数[29 600 L·(mol·cm)⁻¹];m为样品质量(g)。

1.2.3 总酚含量测定

采用Folin-Ciocalteu法测定小麦籽粒中总酚含量^[17]。取提取液0.2 mL,加入10%的Na₂CO₃溶液1.5 mL后定容至10 mL,在35℃下水浴30 min后测定765 nm处吸光度值。

1.2.4 类黄酮含量测定

用NaNO₂-Al(NO₃)₃比色法^[18]测定小麦籽粒中类黄酮含量。取提取液1.0 mL,加入5% NaNO₂溶液1.0 mL,静置反应6 min;再加入10%的Al(NO₃)₃溶液1.0 mL,静置反应6 min,最后加入4%的NaOH溶液4 mL并定容至10 mL,静置反应15 min后测定510 nm处吸光度值。

1.2.5 抗氧化能力的测定

铁离子还原抗氧化能力测定(FRAP值)的测定参照Sochor等^[19]的方法并加以改进,分别取

0.1 mL提取液、3 mL FRAP工作液、0.3 mL蒸馏水混匀后反应5 min,测定593 nm处吸光度值。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH·)自由基清除率的测定参考Hu等^[20]方法,取1 mL提取液及4 mL的0.25 mmol·L⁻¹ DPPH溶液,在37℃下避光反应30 min后,以4 000 r·min⁻¹的转速离心10 min,测定510 nm处吸光度值,计算DPPH·清除率。

$$\text{DPPH}\cdot \text{清除率} = \left[1 - \frac{(A_1 - A_2)}{A_0} \right] \times 100\%$$

式中,A₁为上清液吸光度值;A₀为以60%乙醇代替提取液的吸光度值;A₂为1 mL提取液及4 mL无水乙醇混匀反应后的吸光度值。

2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS⁺·)自由基清除率的测定参考Zhou等^[21]检测方法加以改进,在离心管中加入0.1 mL提取液,3.9 mL ABTS工作液,准确反应6 min,测定734 nm处吸光度值。

$$\text{ABTS}^+\cdot \text{清除率} = \left(1 - \frac{A_1}{A_0} \right) \times 100\%$$

式中,A₁为提取液与工作液混匀反应后的吸光度值;A₀为以60%乙醇为对照的吸光度值。

羟基(·OH)自由基清除率的测定参考王盼等^[22]的检测方法加以改进,向离心管中加入9 mmol·L⁻¹ FeSO₄溶液,提取液及H₂O₂溶液各2 mL,混匀后室温静置10 min,再加入2 mL的9 mmol·L⁻¹水杨酸-乙醇溶液,混匀后25℃水浴反应30 min,在510 nm处测定吸光度值A₁,相同条件下以60%乙醇代替提取液,测定吸光度值A₀,以及将2 mL的9 mmol·L⁻¹ FeSO₄溶液、2 mL提取液、2 mL H₂O₂溶液混匀后室温静置10 min,再加入2 mL的无水乙醇,测定吸光度A₂。

$$\cdot\text{OH} \text{清除率} = \left[1 - \frac{(A_1 - A_2)}{A_0} \right] \times 100\%$$

式中,A₁为提取液与试剂混匀反应后的吸光度值;A₀为以60%乙醇为对照的吸光度值;A₂为以无水乙醇代替水杨酸-乙醇溶液的吸光度值。

1.3 数据处理

用Excel 2010进行数据整理,用SPSS 21.0软件进行统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)比较各组均值,显著性水平为0.05,以主成分综合评价法通过公式计算数据得分,以Origin 2019绘制图形。

2 结果与分析

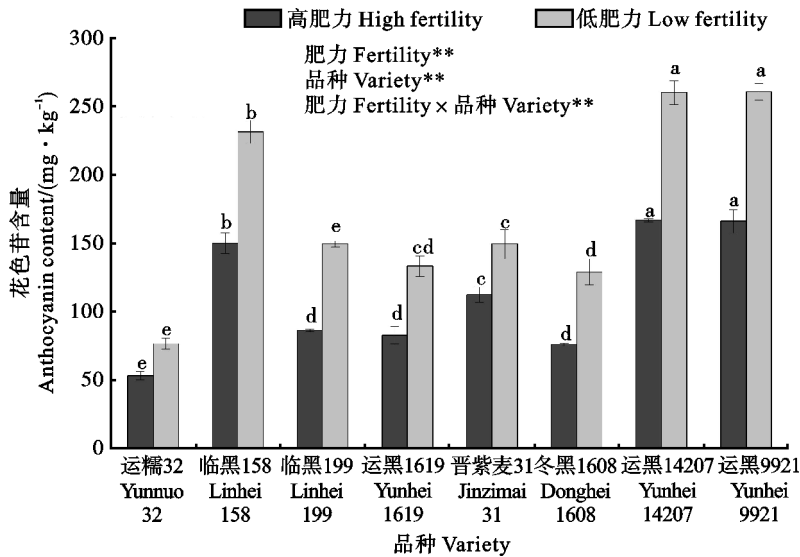
2.1 高低土壤肥力条件下小麦籽粒花色苷含量

由图1可知,低肥力土壤小麦籽粒花色苷含量均高于高肥力土壤,增幅为33.20%~73.57%。高肥力土壤小麦籽粒花色苷含量从高到低表现为运黑14207、运黑9921、临黑158、晋紫麦31、临黑199、运黑1619、冬黑1608、运糯32;低肥力土壤小麦籽粒花色苷含量从高到低表现为运黑9921、运黑14207、临黑158、晋紫麦31、临黑199、运黑1619、冬黑1608、运糯32。花色苷含量表现为蓝

粒小麦较高,黑粒小麦次之,白粒小麦最低。肥力、品种、肥力×品种对花色苷含量影响均显著。

2.2 高低土壤肥力条件下小麦籽粒总酚含量

由图2可知,低肥力土壤小麦总酚含量均低于高肥力土壤,降幅为4.12%~56.46%。高肥力土壤总酚含量从高到低依次为运黑9921、临黑199、临黑158、冬黑1608、运黑14207、临黑1619、晋紫麦31、运糯32;低肥力土壤总酚含量从高到低依次为临黑158、冬黑1608、运黑14207、临黑199、运黑9921、晋紫麦31、临黑1619、运糯32。肥力、品种、肥力×品种对总酚含量均具有显著影响。



不同小写字母表示同一肥力水平下小麦品种(系)之间差异显著($P < 0.05$)。* 和 ** 分别代表 0.05 和 0.01 水平显著。下同。

Different letters above the column indicate significant differences among wheat varieties (lines) under the same fertility level ($P < 0.05$). * and ** stand for significant difference at 0.05 and 0.01 levels. The same in figures 2—4.

图1 不同肥力条件下不同粒色小麦籽粒花色苷含量

Fig. 1 Anthocyanin content of different colored-grain wheat under different soil fertility conditions

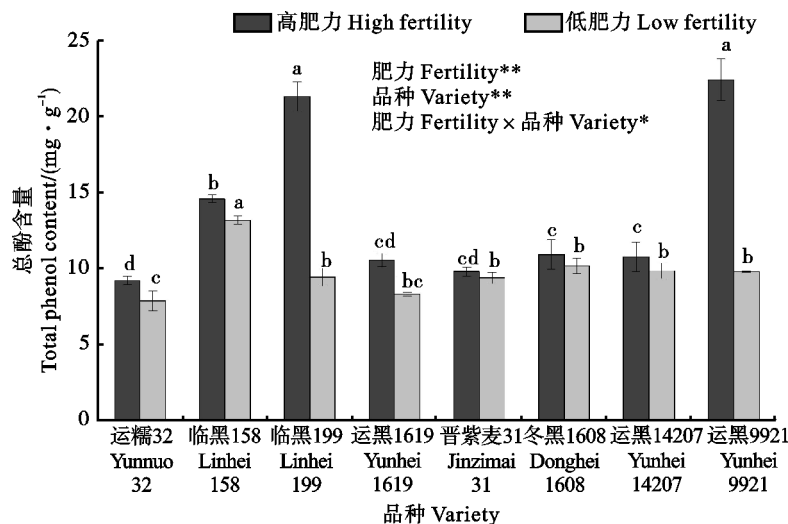


图2 不同肥力条件下不同粒色小麦籽粒总酚含量

Fig. 2 Total phenol content of different colored-grain wheat under different soil fertility conditions

2.3 高低土壤肥力条件下小麦籽粒类黄酮含量

由图 3 可知,低肥力土壤小麦籽粒类黄酮含量多数低于高肥力土壤。高肥力土壤小麦籽粒类黄酮含量从高到低依次为临黑 158、运黑 9921、临黑 199、临黑 1619、运黑 14207、冬黑 1608、晋紫麦

31、运糯 32,低肥力土壤从高到低依次为临黑 158、临黑 199、运黑 9921、冬黑 1608、运黑 1619、运黑 14207、晋紫麦 31、运糯 32。白粒小麦类黄酮含量低于黑粒小麦及蓝粒小麦。肥力、品种、肥力×品种对类黄酮含量均具有显著影响。

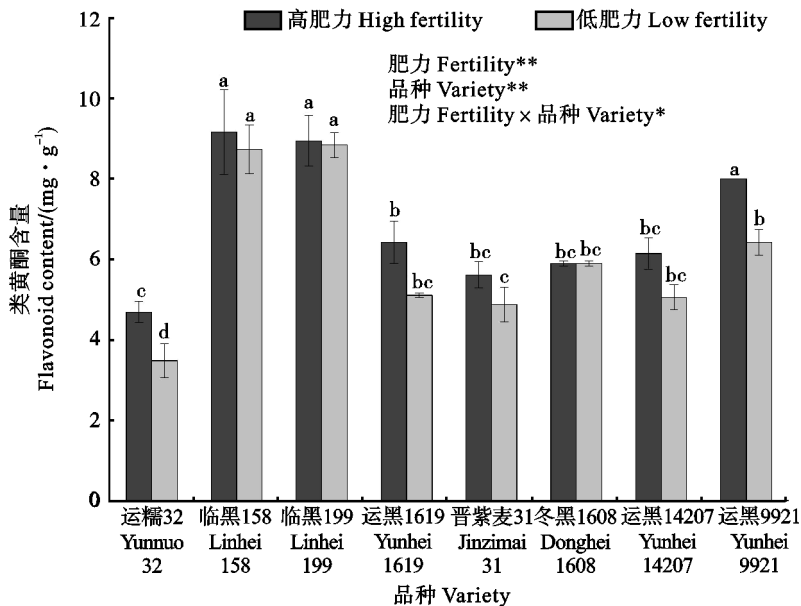


图 3 不同肥力条件下不同粒色小麦籽粒类黄酮含量

Fig. 3 Flavonoid content of different colored-grain wheat under different soil fertility conditions

2.4 高低土壤肥力条件下小麦籽粒抗氧化能力

由图 4 可知,小麦籽粒 FRAP 值表现为低肥力土壤低于高肥力土壤,降幅为 2.97%~17.85%,其中临黑 158 和临黑 199 降幅较大(图 4A)。小麦籽粒的 DPPH· 自由基清除率均表现为低肥力处理高于高肥力处理,增幅为 3.26%~45.50%,其中运糯 32 和冬黑 1608 增幅较大(图 4B)。小麦籽粒 ABTS⁺· 自由基清除率表现为低肥力土壤低于高肥力土壤,降幅为 4.44%~26.13%,其中运黑 1619 降幅最大(图 4C)。运糯 32、临黑 158、晋紫麦 31、冬黑 1608、运黑 14207 及运黑 9921 在低肥力土壤·OH 自由基清除率高于高肥力土壤,增幅为 0.87%~28.57%。临黑 199 及运黑 1619 则表现为低肥力土壤·OH 自由基清除率低于高肥力土壤(图 4D)。肥力、品种、肥力×品种对 FRAP 值、DPPH· 自由基清除率、ABTS⁺· 自由基清除率、·OH 自由基清除率均具有显著影响。

2.5 土壤肥力因子与抗氧化指标的相关性分析

由图 5 可知,籽粒花色苷含量与土壤有机质及全氮含量均呈负相关,与速效磷及速效钾含

量均呈正相关,而总酚与土壤有机质含量($P < 0.05, r = 0.52$)、全氮含量均呈正相关,与速效钾,速效磷含量均呈负相关;类黄酮与土壤肥力因子均呈负相关。DPPH· 与·OH 自由基清除率与多数肥力因子均呈负相关。ABTS⁺· 自由基清除率和 FRAP 值与土壤有机质、全氮含量($P < 0.05, r = 0.61$)均呈正相关,与速效磷、速效钾之间均呈负相关。

2.6 主成分综合评价结果

基于 8 种不同粒色小麦品种在不同肥力水平下的花色苷、总酚、类黄酮及抗氧化能力(FRAP、DPPH·、ABTS⁺· 及·OH),对 8 种不同粒色小麦品种进行主成分分析,得到 7 个主成分的特征值、贡献率和累积贡献率(表 1)。第一主成分 PC1 的特征值为 2.489,方差贡献率为 35.56%,第二主成分 PC2 的特征值 1.770,方差贡献率为 25.29%,第三主成分 PC3 的特征值为 1.409,方差贡献率为 20.13%,前 3 个主成分累积贡献率达到 80.98%,可以反映原始数据的绝大部分信息,因此选取前 3 个主成分作为综合评价指标。

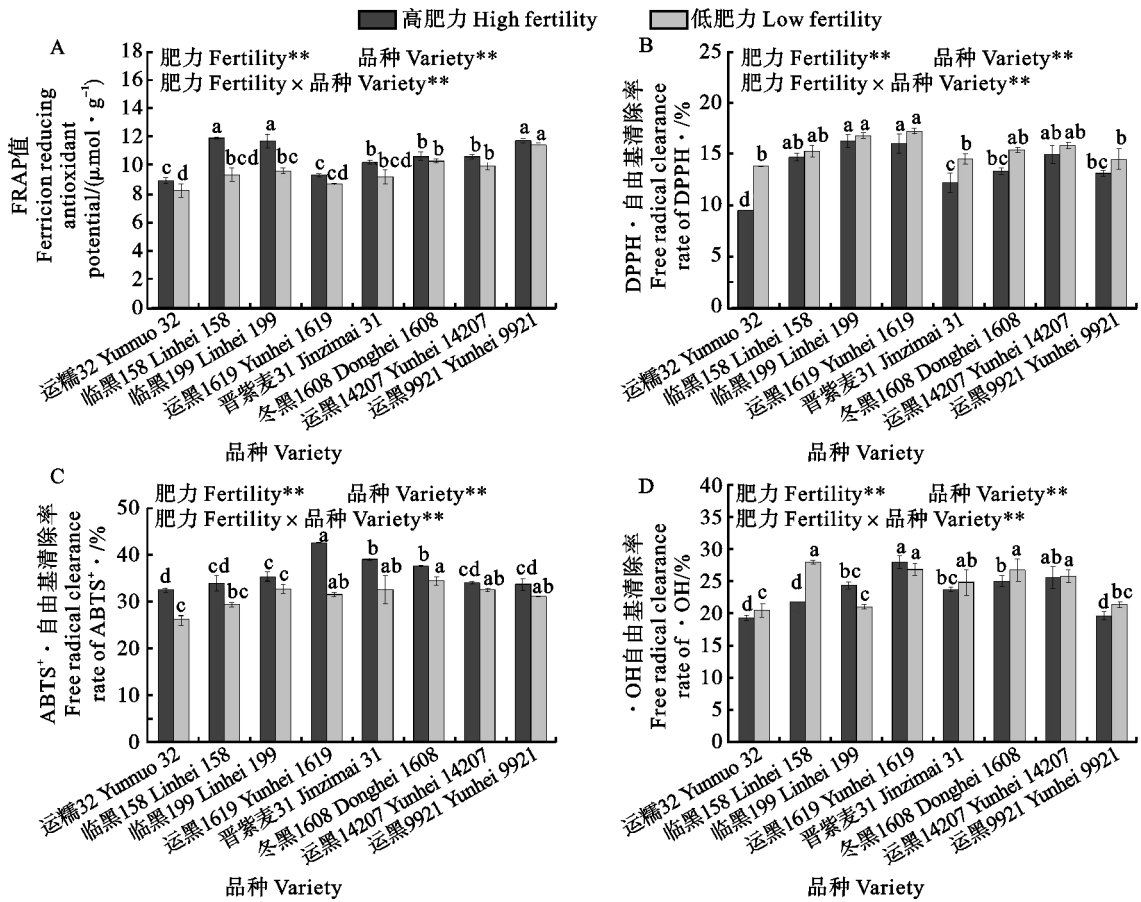
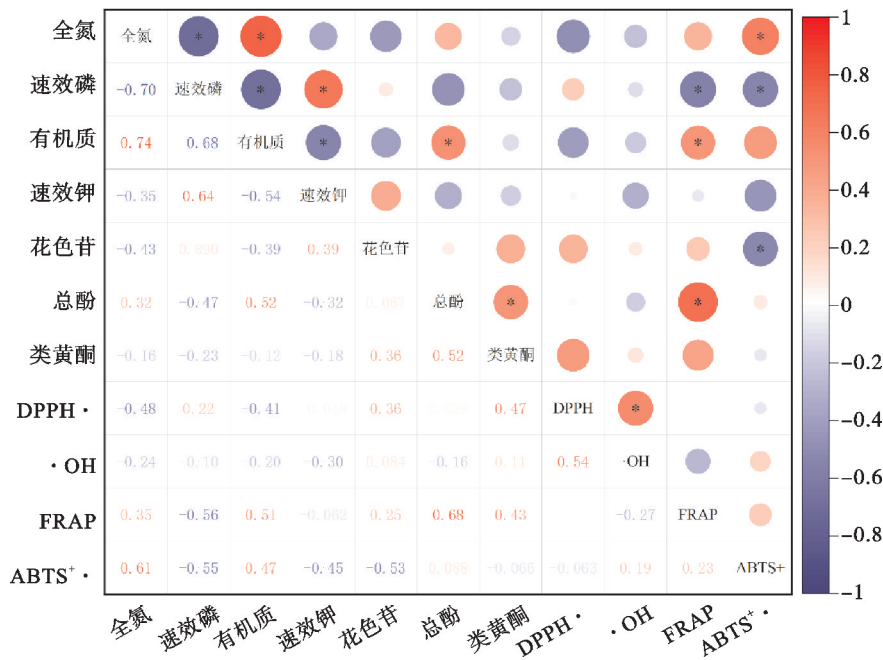


图 4 不同肥力条件下不同粒色小麦籽粒抗氧化能力

Fig. 4 Antioxidant capacity of different colored-grain wheat under different soil fertility conditions



* : $P < 0.05$.

图 5 土壤肥力因素与抗氧化物质、抗氧化能力的相关性

Fig. 5 Correlation between soil fertility factors and antioxidant substances and antioxidant capacity

由主成分因子对应的特征向量计算成分因子的得分 Y1、Y2 及 Y3,再以每个主成分的贡献率为权重,得出不同彩色小麦品种的综合得分 F(表 2 和表 3)。将高低肥力土壤条件下的各小麦品种(系)的综合得分平均后,综合得分由大到小依次

为:临黑 199、临黑 158、运黑 1619、冬黑 1608、运黑 14207、运黑 9921、晋紫麦 31、运糯 32。高低肥力土壤条件下平均综合得分均为黑粒小麦最高,蓝粒小麦次之,白粒小麦最低。高肥力土壤条件下小麦得分均高于低肥力土壤条件。

表 1 7 个性状间的总方差解释

Table 1 Explanation of the total variance among the seven traits

初始特征值 Initial eigenvalue	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
特征值 Eigenvalue	2.489	1.770	1.409	0.623	0.330	0.254	0.125
贡献率 Contribution rate/%	35.556	25.288	20.133	8.895	4.713	3.627	1.786
累积贡献率 Accumulating contribution rate%	35.556	60.845	80.978	89.873	94.586	98.214	100

表 2 7 个性状前 3 个主成分所对应的特征向量

Table 2 Eigenvectors corresponding to the first three principal components of seven traits

指标 Index	PC1	PC2	PC3
花色苷 Anthocyanins	0.188	0.365	-0.549
总酚 Total phenols	0.536	-0.210	0.021
类黄酮 Flavonoids	0.559	0.059	-0.034
FRAP 值 FRAP value	0.553	-0.170	-0.009
DPPH· 自由基清除率 Free radical clearance rate of DPPH·	0.179	0.634	-0.026
ABTS ⁺ 自由基清除率 Free radical clearance rate of ABTS ⁺	0.167	-0.005	0.751
·OH 自由基清除率 Free radical clearance rate of ·OH	-0.013	0.623	0.363

表 3 9 个主成分因子综合得分

Table 3 Comprehensive scores of the nine principal component factors

土壤肥力	品种 Variety	Y1	Y2	Y3	F	排名
高肥力土壤 HF	临黑 199 Linhei 199	2.80	-0.28	0.82	1.10	1
	运黑 1619 Yunhei 1619	-0.21	1.16	2.76	0.76	2
	临黑 158 Linhei 158	2.13	-0.68	-0.33	0.53	3
	运黑 9921 Yunhei 9921	2.56	-1.98	-0.69	0.29	5
	运黑 14207 Yunhei 14207	0.13	0.57	0.05	0.20	7
	冬黑 1608 Donghei 1608	-0.18	-0.62	1.50	0.08	9
	晋紫麦 31 Jinzimai 31	-0.53	-0.96	1.34	-0.16	13
	运糯 32 Yunnuo 32	-2.20	-2.93	0.06	-1.51	15
低肥力土壤 LF	临黑 158 Linhei 158	0.65	1.73	-1.15	0.44	4
	冬黑 1608 Donghei 1608	-0.23	0.83	0.60	0.25	6
	临黑 199 Linhei 199	0.42	0.42	-0.70	0.12	8
	运黑 14207 Yunhei 14207	-0.36	1.54	-1.00	0.06	10
	运黑 1619 Yunhei 1619	-1.42	1.77	0.00	-0.07	11
	运黑 9921 Yunhei 9921	0.62	0.01	-1.85	-0.14	12
	晋紫麦 31 Jinzimai 31	-1.27	0.41	-0.15	-0.39	14
	运糯 32 Yunnuo 32	-2.90	-0.99	-1.26	-1.54	16

3 讨论

土壤肥力水平对小麦的生长、产量和品质形

成至关重要。关于土壤肥力水平对小麦籽粒抗氧化物质的影响研究结果存在一定差异,这与土壤肥力中的关键调控因子以及其含量或浓度密切相关

关^[22]。Engert 等^[23]研究表明,适量氮肥投入可提高小麦籽粒中酚酸的含量。而 Langenkemper 等^[24]则指出,未施肥处理的小麦籽粒中的酚类化合物含量高于施肥处理。在本研究中,黑粒小麦总酚和类黄酮含量在高肥力土壤较低肥力土壤高,可能是因为高肥力土壤下有机质促进了氨基酸等中间产物的积累,促进了酚类化合物的生物合成途径^[22]。与总酚和类黄酮不同的是,低肥力土壤下种植的黑小麦籽粒花色苷含量高于高肥力土壤,这与前人研究结果一致^[11-12]。低肥力条件刺激了次生代谢物的生物合成,增加花色苷的合成以增强对环境的适应能力^[25]。不同粒色之间的抗氧化物质也存在较大差异。蓝粒小麦籽粒花色苷含量高于黑粒、白粒小麦,而黑粒小麦籽粒总酚、类黄酮含量高于蓝粒、白粒小麦,这与前人研究结果一致^[26-27]。但也有研究表明,因品种效应,小麦紫黑色籽粒花色苷含量高于蓝色籽粒^[28]。黑粒小麦中总酚含量、总黄酮含量以及抗氧化活性均显著高于红粒小麦和白粒小麦^[29]。总体上,肥力、品种、肥力×品种对花色苷、总酚和类黄酮含量均具有显著影响。

FRAP 值、DPPH·清除率、ABTS⁺·清除率和·OH清除率是衡量植物抗氧化能力的重要指标^[30]。本研究中,小麦籽粒 FRAP 值及 ABTS⁺·清除率均表现为高肥力土壤下高于低肥力土壤,DPPH·清除率在低肥力土壤下高于高肥力土壤。除个别品种外,·OH清除率总体在低肥力土壤下高于高肥力土壤。可见,小麦籽粒抗氧化能力指标受土壤肥力影响表现不同。李耀光等^[29]研究表明 FRAP 值随施氮量的增加而增加,DPPH·清除率随施氮量的增加而减少。本研究结果与冯健超等^[22]发现在高氮水平下彩色小麦的 FRAP 值更高的结果一致。Ma 等^[30]报道在施肥氮量不高于 210 kg·hm⁻² 的条件下随施氮量增大,水稻·OH清除率呈现先增加后减少的趋势。Falcinelli 等^[31]研究作物生长期持续施肥 ABTS⁺·清除率高于未施肥处理,本研究结果与其一致,这主要是由于 ABTS⁺·清除率、FRAP 值与 DPPH·清除率存在不同的反应机制^[32],从而导致高低肥力土壤下响应结果不同。可见,土壤氮水平对植物抗氧化能力具有重要影响。本研究发现,土壤全氮含量和有机质含量与多数抗氧化指标呈正相关。这说明,土壤全氮和有机质是调控植株抗氧化能力的主要肥力因子。尽管 An-

uar 等^[33]指出,颜色外观并不一定是反映抗氧化水平的主要指标,但是本研究中高低肥力条件下黑粒小麦的抗氧化能力均高于蓝粒和白粒小麦,这可能是肥力水平对抗氧化物质产生显著影响,从而影响了籽粒的抗氧化能力^[34-35]。因此,生产上可通过土壤肥力调控黑粒小麦抗氧化能力,提升抗氧化物质水平。

4 结论

肥力、品种、肥力×品种均对抗氧化物质含量及抗氧化能力均具有显著影响。低肥力土壤下小麦籽粒花色苷积累、DPPH·及·OH清除率均高于高肥力土壤,而总酚、类黄酮含量、FRAP 值及 ABTS⁺·清除率均低于高肥力土壤。其中,花色苷含量和 ABTS⁺·清除率受土壤肥力的调控作用较强。高低肥力土壤条件下小麦抗氧化能力大小表现为黑粒>蓝粒>白粒。本试验条件下,高肥力土壤种植的黑粒小麦具有较强的抗氧化能力。

参考文献:

- [1]张慧,李莉,张朝旭,等.彩色小麦籽粒营养成分成分的差异[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(6):911.
ZHANG H, LI L, ZHANG C X, et al. Differences in nutritional functional components of color wheat grains [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(6):911.
- [2]周飘,陈庆富,黄娟.粮食作物保健食品的研究进展[J].中国食物与营养,2019,25(7):20.
ZHOU P, CHEN Q F, HUANG J. Research advancement on food crop health products [J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(7):20.
- [3]杨丽娟,付亮,任星旭,等.15份黑、紫色小麦种质资源的遗传差异及籽粒花青素含量[J].河南农业科学,2022,51(12):28.
YANG L J, FU L, REN X X, et al. Genetic differences and anthocyanin contents of 15 black or purple wheat germplasm resources [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(12):28.
- [4]宗学风,张建奎,李帮秀,等.小麦籽粒颜色与抗氧化作用[J].作物学报,2006,32(2):237.
ZONG X F, ZHANG J K, LI B X, et al. Relationship between antioxidation and grain colors of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2):237.
- [5]邓佳琪,李娟娟,贺馨怡,等.光照处理对发芽燕麦中多酚类物质含量及抗氧化活性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(10):120.
DENG J Q, LI J J, HE X Y, et al. Effect of light treatments on polyphenols, flavonoids, and antioxidant activities in sprouted oats (*Avena nuda* L.) [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(10):120.
- [6]侯孟月,罗雯,程小毛,等.千家寨不同海拔野生大理茶代谢产物特征[J].生态学杂志,2024,43(4):1092.
HOU M Y, LUO W, CHENG X M, et al. Characteristics of metabolites of wild *Camellia talinensis* at different altitudes in Qianjiazhai [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(4):1092.
- [7]MARTÍNEZ S, FUENTES C, CARBALLO J. Antioxidant activity, total phenolic content and total flavonoid content in sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) cultivars grown in

- northwest Spain under different environmental conditions [J]. *Foods*, 2022, 11(21):3519.
- [8] 凌岩, 秦健, 尚旭岚, 等. 施氮量对青钱柳幼苗生长和总酚积累的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(4):45.
- LING Y, QIN J, SHANG X L, *et al.* Effect of applying amount of nitrogen on growth and total phenolic accumulation in *Cyclocarya paliurus* seedling [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(4):45.
- [9] 赖银华. 基于转录组和代谢组的雪柑根响应缺氮的分子生理机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- LAI Y H. Molecular and physiological mechanisms of *Citrus sinensis* root response to nitrogen deficiency revealed by transcriptome and metabolome [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.
- [10] 伍鑫. 施氮量对绿米稻色素含量及产量和品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
- WU X. Effects of nitrogen application rate on pigment content, yield and quality of green rice [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
- [11] SUN X H, LI X X, WANG Y B, *et al.* MdMCK9-mediated the regulation of anthocyanin synthesis in red-fleshed apple in response to different nitrogen signals [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(14):7755.
- [12] FAN X, XU Z, WANG F, *et al.* Identification of colored wheat genotypes with suitable quality and yield traits in response to low nitrogen input [J]. *PLoS One*, 2020, 15(4):e0229535.
- [13] TIAN W F, WILSON T L, CHEN G J, *et al.* Effects of environment, nitrogen, and sulfur on total phenolic content and phenolic acid composition of winter wheat grain [J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(4):903.
- [14] KAUR S, KUMARI A, SHARMA N, *et al.* Physiological and molecular response of colored wheat seedlings against phosphate deficiency is linked to accumulation of distinct anthocyanins [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 170:340.
- [15] 陈乔乔, 翁少全, 程亮, 等. 地道金银花品质与土壤肥力关系的研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4):734.
- CHEN Q Q, WENG S Q, CHENG L, *et al.* Relationship between genuine honeysuckle quality and soil fertility [J]. *Soils*, 2021, 53(4):734.
- [16] 时玉晴, 苏东民, 苏东海, 等. 超声波辅助法提取黑色小麦麸皮花色苷工艺优化[J]. *粮食与油脂*, 2015, 28(4):16.
- SHI Y Q, SU D M, SU D H, *et al.* Optimization of extraction process for black wheat bran anthocyanins by ultrasonic-assisted extraction [J]. *Cereals & Oils*, 2015, 28(4):16.
- [17] 牛新奎, 韩小贤, 郑学玲. 黑小麦粉的抗氧化成分及活性[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(9):293.
- NIU X K, HAN X X, ZHENG X L. Antioxidant components and activity of *Triticum aestivum* flour [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(9):293.
- [18] 郭函. 喷晒对彩麦营养品质及花青素生物合成酶基因表达的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
- GUO H. Effects of selenium spraying on nutritional quality and anthocyanin biosynthesase gene expression in colored wheat [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
- [19] SOCHOR J, RYVOLOVA M, KRYSTOFOVA O, *et al.* Fully automated spectrometric protocols for determination of antioxidant activity: Advantages and disadvantages [J]. *Molecules*, 2010, 15(12):8618.
- [20] HU F L, LU R L, HUANG B, *et al.* Free radical scavenging activity of extracts prepared from fresh leaves of selected Chinese medicinal plants [J]. *Fitoterapia*, 2004, 75(1):21.
- [21] ZHOUK Q, SU L, YU L L. Phytochemicals and antioxidant properties in wheat bran [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(20):6108.
- [22] 冯健超, 许倍铭, 江薛丽, 等. 小麦籽粒不同层次酚类物质与抗氧化活性差异及氮肥调控效应[J]. *作物学报*, 2022, 48(3):710.
- FENG J C, XU B M, JIANG X L, *et al.* Distribution of phenolic compounds and antioxidant activities in layered grinding wheat flour and the regulation effect of nitrogen fertilizer application [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(3):710.
- [23] ENGERT N, JOHN A, HENNING W, *et al.* Effect of sprouting on the concentration of phenolic acids and antioxidative capacity in wheat cultivars (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum* L.) in dependency of nitrogen fertilization [J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2011, 84:111.
- [24] LANGENKÄMPER G, ZÖRB C, SEIFERT M, *et al.* Nutritional quality of organic and conventional wheat [J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2006, 80(2):150.
- [25] XU X X, QIN H H L, LIU C, *et al.* Transcriptome and metabolome analysis reveals the effect of nitrogen-potassium on anthocyanin biosynthesis in Fuji apple [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(48):15057.
- [26] AMAROWICZ R, CWALINA-AMBROZIAK B, JANIACKM A, *et al.* Effect of N fertilization on the content of phenolic compounds in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers and their antioxidant capacity [J]. *Agronomy*, 2020, 10(8):1215.
- [27] 张现. 低氮胁迫下海棠花中花青素合成与氮代谢的作用关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021:1.
- ZHANG X. Anthocyanin synthesis and nitrogen metabolism interact in Crabapple under low nitrogen stress [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021:1.
- [28] 邬陈芳. 高营养彩色小麦种质资源筛选及锌铁含量全基因组关联分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023:1.
- WU C F. Screening the high nutrition color wheat germplasm resources and genome-wide association analysis of zinc and iron in wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023:1.
- [29] 李耀光. 不同粒色小麦籽粒抗氧化物质积累机理及氮磷肥调控效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016:1.
- LI Y G. Accumulation mechanism of antioxidant and regulation effect of nitrogen and phosphorus fertilizer application on wheat grain with different grain color Study on the accumulation mechanism of antioxidant substances in wheat grains with different grain colors and the regulation effect of nitrogen and phosphorus fertilizer [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016:1.
- [30] MA Y C, ZHANG S, FENG D G, *et al.* Effect of different doses of nitrogen fertilization on bioactive compounds and antioxidant activity of brown rice [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10:1071874.
- [31] FALCINELLI B, GALIENI A, TOSTI G, *et al.* Effect of wheat crop nitrogen fertilization schedule on the phenolic content and antioxidant activity of sprouts and wheatgrass obtained from offspring grains [J]. *Plants*, 2022, 11(15):2042.
- [32] RUMPF J, BURGER R, SCHULZE M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233:123470.
- [33] ANUAR N, TAHA R M, MAHMAD N, *et al.* Correlation of colour, antioxidant capacity and phytochemical diversity of imported saffron by principal components analysis [J]. *Pigment & Resin Technology*, 2017, 46(2):107.
- [34] LI S, LI S K, GAN R Y, *et al.* Antioxidant capacities and total phenolic contents of infusions from 223 medicinal plants [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 51:289.
- [35] SHEN S Y, HUANG R, LI C L, *et al.* Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among *Sorghum* grains with different applications [J]. *Molecules*, 2018, 23(5):1203.