

· 研究报告 ·

## 山西小麦籽粒叶黄素含量变异及遗传特性分析

武棒棒<sup>1†</sup>, 郝宇琼<sup>2†</sup>, 杨淑斌<sup>1</sup>, 黄雨茜<sup>1</sup>, 关攀峰<sup>3</sup>, 郑兴卫<sup>2</sup>, 赵佳佳<sup>2</sup>  
乔玲<sup>2</sup>, 李晓华<sup>2</sup>, 刘维仲<sup>1\*</sup>, 郑军<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>山西师范大学生命科学学院, 太原 030031; <sup>2</sup>山西农业大学小麦研究所, 农业农村部有机旱作农业重点实验室(省部共建), 临汾 041000; <sup>3</sup>郑州大学农学院, 郑州 450001

**摘要** 叶黄素在保护视力、预防糖尿病、心血管硬化和癌症等方面具有良好功效。利用小麦(*Triticum aestivum*)进行叶黄素的生物强化逐渐引起人们的重视。以3种环境下种植的194份山西小麦为材料, 采用有机溶剂浸提法提取叶黄素, 利用高效液相色谱法测定不同种质的叶黄素含量, 分析小麦叶黄素含量的广义遗传力, 及其与籽粒颜色、冬春性、地域分布、品种类型和主要农艺性状的关系, 并通过全基因组关联分析挖掘叶黄素含量相关的遗传位点。结果表明, 山西小麦品种间叶黄素含量变异范围较广, 变异系数为33.12%–48.57%, 基因型是影响叶黄素含量的主要因素, 3种环境下小麦叶黄素含量范围分别为0.67–4.03、0.16–5.05和0.16–3.63  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 冬性小麦品种的平均含量高于春性品种, 水地品种平均含量高于旱地品种, 籽粒颜色与育种年代对叶黄素含量无显著影响; 抽穗期、株高和千粒重与叶黄素含量呈显著负相关, 其它农艺性状对叶黄素均无明显影响; 全基因组关联分析在1B、3A和7A染色体上发现4个与叶黄素含量相关的主效位点, 其中*QLuc.3A*和*QLuc.7A.1*是影响叶黄素含量的新位点。研究结果可为小麦叶黄素生物强化品种的选育和栽培提供有价值的信息。

**关键词** 小麦, 叶黄素, 遗传因素, 农艺性状, 全基因组关联分析

武棒棒, 郝宇琼, 杨淑斌, 黄雨茜, 关攀峰, 郑兴卫, 赵佳佳, 乔玲, 李晓华, 刘维仲, 郑军 (2023). 山西小麦籽粒叶黄素含量变异及遗传特性分析. 植物学报 58, 535–547.

叶黄素是类胡萝卜素的主要成分, 约占类胡萝卜素总量的70%–95% (Hidalgo and Brandolini, 2014)。叶黄素是构成视网膜黄斑色素的主要成分, 可有效过滤蓝光, 从而降低白内障、近视和色素性视网膜炎的发病率, 因此又被称为“眼睛维生素” (Digesù et al., 2009; Blanco et al., 2011)。此外, 叶黄素具有较强的抗氧化和氧自由基清除能力, 在预防机体衰老引起的心血管硬化、糖尿病和肿瘤等慢性疾病方面也发挥作用。叶黄素在植物和细菌中能够从头合成, 但在人和动物体内缺乏合成途径, 只能从食物中摄取, 每人每天必须摄入一定量的叶黄素补充身体所需。德国和加拿大相关研究表明, 成年人平均每天的叶黄素摄入量分别为1.9和1.4 mg, 美国则建议平均每天摄入1–2 mg的叶黄素和玉米黄质(Institute of Medicine

(US) Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds, 2000)。由于人口老龄化和叶黄素缺乏, 预计到2050年全球老年黄斑变性患者的数量将从2020年的1.96亿增长至2.88亿(FAO et al., 2017)。因此, 如何健康有效地保障叶黄素安全摄入引起人们的普遍关注。

叶黄素主要有3种补充途径: 药剂补充(即服用含有叶黄素的药丸)、食品强化(在食品中添加叶黄素)和饮食多样化。然而受经济水平和饮食习惯的制约, 很多地区无力消费除主食外的多样化食品。此外, 摄入过多人工合成的叶黄素容易引发皮肤变黄, 进而诱发胡萝卜素血症(Li et al., 2020)。利用育种或栽培措施进行主粮作物的叶黄素富集, 显然是一种健康、覆盖面广且经济有效的方法, 可使农村和欠发达地区人

收稿日期: 2022-04-20; 接受日期: 2022-09-19

基金项目: 山西省重点研发项目(No.2022ZDYF108-02)和山西省现代农业小麦产业技术体系(No.2023-CYJSTX02-05)

† 共同第一作者。

\* 通讯作者。E-mail: liuwzh@sxnu.edu.cn; sxnkyzj@126.com

口受益。小麦(*Triticum aestivum*)作为重要的口粮作物,其种植范围广,因此选育富含叶黄素的品种,通过日常饮食摄入补充叶黄素,对人类健康和疾病预防具有重要意义。关于小麦叶黄素含量的报道多见于四倍体小麦,而对六倍体小麦研究较少。我国种植的小麦基本是六倍体,因此筛选六倍体小麦中富含叶黄素的种质资源,阐明叶黄素的遗传规律和特性,可促进我国功能农业的快速发展。

山西全域位于黄土高原东部,北邻内蒙古草原,南接中原腹地,东依太行,西界黄河,外缘有山脉环绕,从南到北横跨6个纬度,海拔高度相差约3 000 m,属温带季风气候。山西小麦种植历史悠久,目前已出土3 000多年前的麦籽粒,仅面食就有1 000多种做法(赵佳佳等, 2021)。传统的面食文化和特殊的地理环境,使山西小麦在长期人工选择和自然选择双重作用下,以营养丰富、口感好且品质优良著称(徐兆飞, 2006)。例如,优质骨干亲本临汾5064衍生了40多个优质小麦新品种(乔玲等, 2018),出自山西的我国第1个春性黑麦(*Secale cereale*)品种黑小麦76 (孙善澄等, 1999)和第1个冬性彩麦品种河东乌麦526 (王秋叶等, 1999),及农业部首届和第2届农业博览会均被评为最佳优良品种的忻79-2060 (朱金宝等, 1995; 王光瑞等, 1997)。可见,山西小麦种质资源作为营养和功能成分的遗传研究材料具有较强的代表性。本文以山西小麦种质为材料,研究了籽粒叶黄素的含量分布及不同遗传因素对叶黄素含量的影响,并采用全基因组关联分析(GWAS)挖掘遗传位点,研究结果可为功能农业发展提供有价值的信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验材料为新中国成立后山西省审定的194份小麦(*Triticum aestivum* L.)品种,其中水地品种99个,旱地品种95个,品种名称、地理分布、冬春性、粒色和审定时间等信息详见附表1。所有材料于2018–2019年和2019–2020年种植于山西农业大学小麦研究所实验基地(临汾市)(111°18'E, 36°2'N),10月上旬播种,翌年6月中旬收获。每份材料播种4行,行长2 m,每行30粒。参试材料在2种水分条件下种植:越冬期灌溉一水(2019–2020年, E1);越冬期、拔节期和孕穗

期灌溉三水(2018–2019年, E2; 2019–2020年, E3),每次灌溉量约700 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

### 1.2 表型性状收集

每行材料2/3抽穗时记录抽穗期(heading date, HD),灌浆期选取10株生长一致的主茎测定旗叶长(flag leaf length, FLL)和旗叶宽(flag leaf width, FLW),成熟后选取10株测量株高(plant height, PH)、穗长(spike length, SL)、穗颈长(spike neck, NS)、穗下节间长(internodes under spikes, SIU)、小穗数(spikelet number per spike, SN)和穗粒数(grain number per spike, GNS)等农艺性状。收获后从样品中随机选取1 000粒种子,重复3次;记录千粒重(1 000-kernel weight, TKW),用游标卡尺测量粒长(grain length, GL)、粒宽(grain width, GW)和粒厚(grain thickness, GT),重复10次取平均值。

### 1.3 化学药品及试剂

叶黄素标准品(色谱级, ≥96%)购自Sigma公司。甲醇、乙腈和正己烷(色谱纯)均购自上海麦克林生化有限公司。丁基羟基甲苯(BHT, ≥99%)、四氢呋喃、乙醚、乙醇、氢氧化钾和丙酮均为分析纯。叶黄素标准品先用少量四氢呋喃溶解,再用甲醇稀释至0.1 mg·mL<sup>-1</sup>后, -80℃保存。配好标准溶液后稀释至1、1.25、2.5、5和10 μg·mL<sup>-1</sup>五个浓度,用于绘制标准曲线。

### 1.4 样品制备及叶黄素提取

将籽粒烘干至含水量为14%左右,使用JFS-13A型实验室旋风式粉碎机磨粉,过100目筛片获得全麦粉,4℃避光储存。提取根据Li等(2016)所述方法,并稍做修改,具体为:称取1.0 g全麦粉,加入6 mL浸提液(丙酮:甲醇=7:3, v/v和0.1% BHT, w/v),漩涡仪剧烈漩涡45秒,放入恒温培养振荡器中, 35℃, 80 r·min<sup>-1</sup>避光振荡1小时。振荡后在高速低温离心机中4℃、10 828 ×g离心10分钟,取上清液;浸提2次。使用氮气吹干仪35℃下将上清液吹干。所剩残留物加3 mL乙醚和3 mL水解介质(50% KOH水溶液:乙醇=1:9, v/v)后,室温下避光摇动2小时,转移3 mL水解产物并加入3 mL体积比为1:1的乙醚和正己烷及3 mL水, 4℃、7 000 ×g离心10分钟,用针头注射器吸去含有KOH的水相,氮气吹干仪35℃下吹干。得到的固形物

用0.5 mL含0.1% BHT的甲醇:乙腈:正己烷=7:2:1 (v/v/v)溶液复溶,充分溶解后,4℃、13 000 ×g离心5分钟,取上清液过0.22 μm有机滤膜至棕色离心管中,−20℃保存备用。

### 1.5 色谱系统及测定条件

Agilent1260 高效液相色谱仪系统为Agilent Chem Station, 配备紫外检测器, 样品环体积为20 μL, 色谱柱为Poroshell 120 EC-C18分析柱, 规格4.6 mm × 150 mm, 粒径4 μm。流动相为A乙腈、B甲醇和C正己烷。流动相过0.22 μm有机滤膜后, 超声脱气20分钟。梯度洗脱30分钟, 流速为1.0 mL·min<sup>−1</sup>, 检测波长450 nm, 进样器和柱温箱的温度分别保持在4℃和25℃。初始洗脱条件为76%流动相A、21.5%流动相B和2.5%流动相C。流动相A的比例在20–22分钟内从76%下降至70%, 流动相B的比例在20–22分钟内从21.5%下降至20%。28–30分钟内, 流动相A的比例增加至76%, 流动相B的比例增加至21.5%。叶黄素标准品用于确定洗脱条件和保留时间, 样品中叶黄素成分通过保留时间鉴定, 自动积分获取峰面积, 外标法定量。每个样品测定3次, 取平均值。

### 1.6 表型数据处理

广义遗传力 $H^2$ 定义为 $H^2=VG/(VG+VE)$ , 其中VG和VE分别为遗传方差以及环境方差。利用JMP Pro16 (2022 JMP Statistical Discovery LLC)计算BLUP

(best linear unbiased prediction)值。使用SPSS 26.0 软件(IBM SPSS Statistics; IBM Corp., Armonk, NY, United States)进行相关性分析和差异显著性比较。使用Origin 2022软件绘图。

### 1.7 全基因组关联分析

使用15K SNP芯片对进行基因型鉴定, 过滤后共有9 793个高质量的SNPs用于后续分析(Zheng et al., 2022)。利用TASSEL5.0软件的混合线性模型(MLM)Q+K对叶黄素含量进行GWAS。通过QQ图(Quantile-Quantile plot)观察得到的 $-\log_{10}(p \text{ value})$ 和预期值确定阈值 $P$ 。利用R语言包(qqman、tidyverse和data.table)将数据结果可视化, 生成曼哈顿图。SNP标记的连锁不平衡(linkage disequilibrium, LD)延伸到每条染色体上。利用PLINK1.9软件计算每条染色体上SNP位点之间的连锁不平衡 $r^2$ 值, 根据 $r^2=0.2$ 扩展区域定义为LD的QTL区间。SNP标记的物理位置由中国春参考基因组IWGSC v1.0获得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 叶黄素含量测定

使用高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)法测定叶黄素标准品, 保留时间约3.23分钟, 色谱图基线平稳, 标品峰形较好, 无明显拖尾; 样品中提取出的叶黄素在HPLC测定中保留时

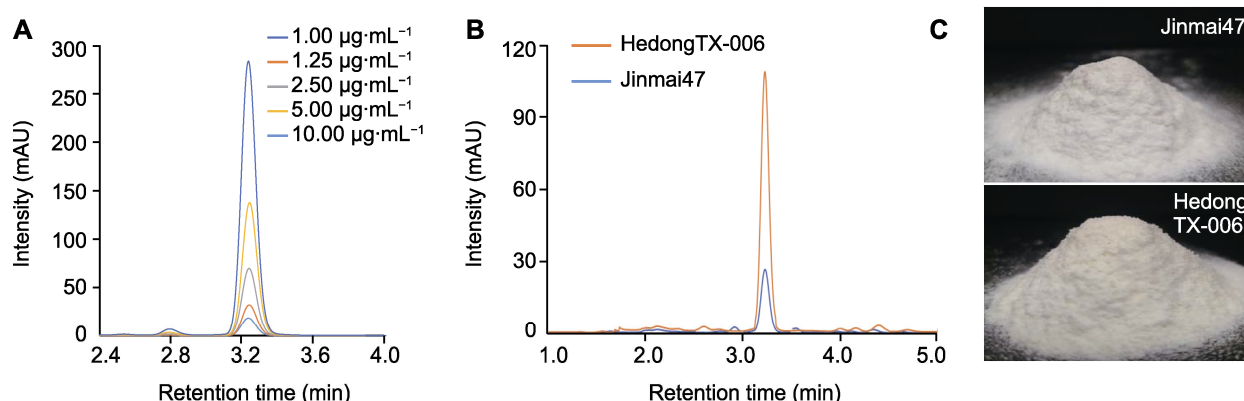


图1 HPLC色谱图及差异品种的面粉实物图

(A) 不同浓度标样的HPLC峰图; (B) 小麦样品HPLC峰图; (C) 面粉实物图

Figure 1 HPLC chromatogram of lutein from standards of different concentrations and flour of samples

(A) HPLC peak plots of lutein from standards of different concentrations; (B) HPLC peak plots of lutein from tested wheat samples; (C) Flour of samples

间与标品一致(图1A, B)。吸取浓度为 $2.5\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的标品和晋麦47溶液, 分别重复测定3次, 相关测定值的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)均小于2%。

标准溶液按浓度从低到高依次进样, 采用峰面积外标法进行定量分析。以浓度为横坐标、吸收峰面积为纵坐标进行线性回归分析, 标准曲线方程为 $Y=32.186X-2.396\ 9$  ( $R^2=0.999\ 8$ )。结果表明回归方程的线性良好, 说明叶黄素含量在 $1\text{--}10\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 范围内呈线性关系, 可用于定量分析。

4个品种提取叶黄素后分别以添加标品和不加标品的处理为对照, 测定3次, 取平均值。检测发现样品的加标回收率均在96%以上(表1), 进一步说明检测方法准确可靠。

4个品种的面粉重复提取5次, 验证提取方法的精密度, 结果表明叶黄素含量的相对标准偏差均小于5% (表2), 说明提取方法的精密度和重复性较好。

2.2 山西小麦品种叶黄素含量变异分析

将3种环境下收获的材料提取叶黄素进行测定, 发现山西小麦品种间的叶黄素含量变异范围较广(附表1),

变异系数为33.84%–43.90%; 含量范围分别为 $0.67\text{--}4.03$ 、 $0.16\text{--}5.05$ 和 $0.16\text{--}3.63\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值分别为 $1.63$ 、 $1.57$ 和 $1.39\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (图2A)。根据叶黄素含量将供试材料分为5级( $<1.0\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 、 $1.0\text{--}1.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 、 $1.5\text{--}2.0\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 、 $2.0\text{--}2.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 和 $>2.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ ), 其中含量在 $1.0\text{--}1.5$ 和 $1.5\text{--}2.0\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 范围内的品种较多, 占总品种数的62%, 超过 $2.5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的品种数分别为11、24和3份(表3)。E1环境下含量最高的3个品种分别为河东TX-006、长4853和晋麦95号(图1C); E2环境下为河东TX-006、太113和山农129; E3环境下为河东TX-006、晋麦95号和临远3158。其中, 河东TX-006、晋麦95号和临远3158在3种环境下的叶黄素

表1 小麦样品叶黄素的加标回收率

Table 1 The spiked recoveries of lutein content with wheat genotypes

Accessions	Sample contents ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Added ( $\mu\text{g}$ )	Detection ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Recoveries (%)
Jinmai47	1.22	3	4.06	96.33
Jinmai98	2.36	5	7.27	98.76
Jinmai84	1.85	4	5.72	97.81
Jinmai919	2.38	5	7.25	98.24

表2 小麦样品叶黄素含量的相对标准偏差( $n=5$ )

Table 2 Relative standard deviation of lutein content with wheat genotypes ( $n=5$ )

Accessions	Samples contents ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )					Average ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	RSD (%)
	1	2	3	4	5		
Jinmai47	1.34	1.37	1.32	1.25	1.28	1.31	3.25
Jinmai98	2.76	2.64	2.93	2.99	2.85	2.83	4.38
Jinmai84	1.89	1.97	1.95	1.74	1.85	1.88	4.36
Jinmai919	2.53	2.66	2.37	2.49	2.59	2.53	3.86

RSD: 相对标准偏差 RSD: Relative standard deviation

表3 不同环境下山西小麦叶黄素含量分组

Table 3 Wheat genotypes grouped by lutein content under different environments

Environment	Number of wheat genotypes grouped by lutein contents				
	$<1.0\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$1.0\text{--}1.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$1.5\text{--}2.0\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$2.0\text{--}2.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$>2.5\ (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$
E1	19	58	68	29	11
E2	41	49	46	19	24
E3	41	74	42	19	3

E1: 2019–2020年度越冬期灌溉1次; E2: 2018–2019年度越冬期、拔节期和孕穗期共灌溉3次; E3: 2019–2020年度越冬期、拔节期和孕穗期共灌溉3次。

E1: Irrigation once during overwintering stage (2019–2020); E2: Irrigation once at overwintering, jointing, and booting stage, respectively (2018–2019); E3: Irrigation once at overwintering, jointing, and booting stage, respectively (2019–2020).

含量均超过 $3.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 是高叶黄素含量品种。

山西省小麦种植生态区自北向南分属于我国北部春麦区(北部)、北部冬麦区(中部)以及黄淮北片冬麦区(南部)。通过比较不同地区选育品种的叶黄素含量, 发现中部地区选育品种的叶黄素含量较高, 高于 $2.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的品种为30.30%; 南部地区品种叶黄素的含量整体较低, 66.67%的品种叶黄素含量低于 $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 北部地区品种叶黄素的含量则全部低于 $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (图2B)。

### 2.3 基因型、环境及其互作对叶黄素含量的影响

研究基因型、环境及其互作对3种环境下叶黄素含量的影响, 结果表明, 叶黄素含量广义遗传力在基因型效应(G)、环境效应(E)和基因型与环境互作效应(G×E)均达到极显著水平。基因型效应对叶黄素含量

的影响最大, 籽粒叶黄素含量主要受基因型的影响, 其次为环境; 3个因素具体表现为基因型效应(67.58%) > 环境效应(31.93%) > 基因型与环境互作效应(0.49%)。

### 2.4 粒色、冬春性、品种类型和育成年代对小麦叶黄素含量的影响

根据籽粒颜色将种质分为红粒和白粒, 比较后发现不同粒色品种间叶黄素含量差异不显著, 除E1环境中红粒品种叶黄素含量略高于白粒外, 其余环境均是白粒品种稍高于红粒(图3A)。小麦主要为冬性和春性品种2种类型, 比较发现冬性品种叶黄素含量均显著高于春性品种, 其中E1和E2环境中冬、春性间叶黄素含量差异极显著(图3B), 可能是冬性品种生育周期长, 使得籽粒中积累了较多的叶黄素。山西小麦品种类型

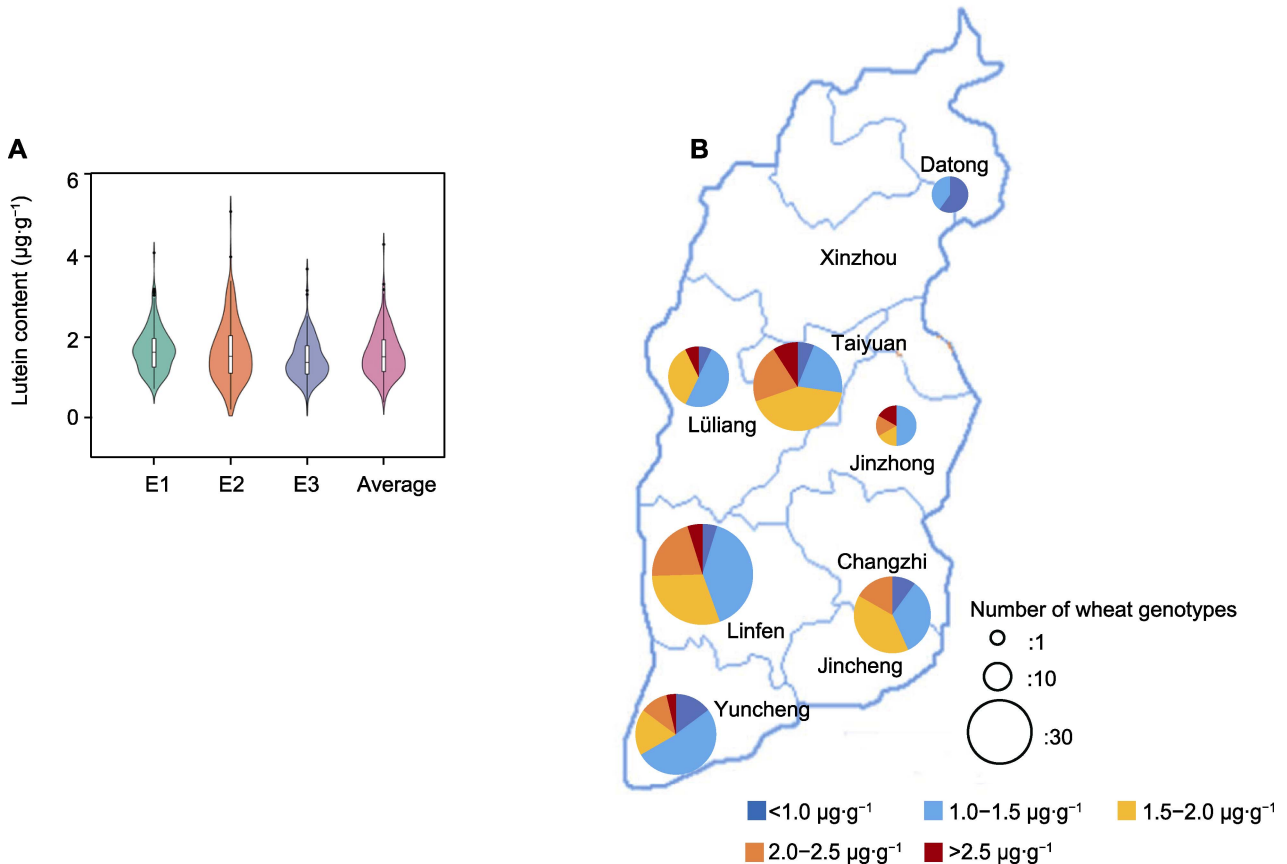
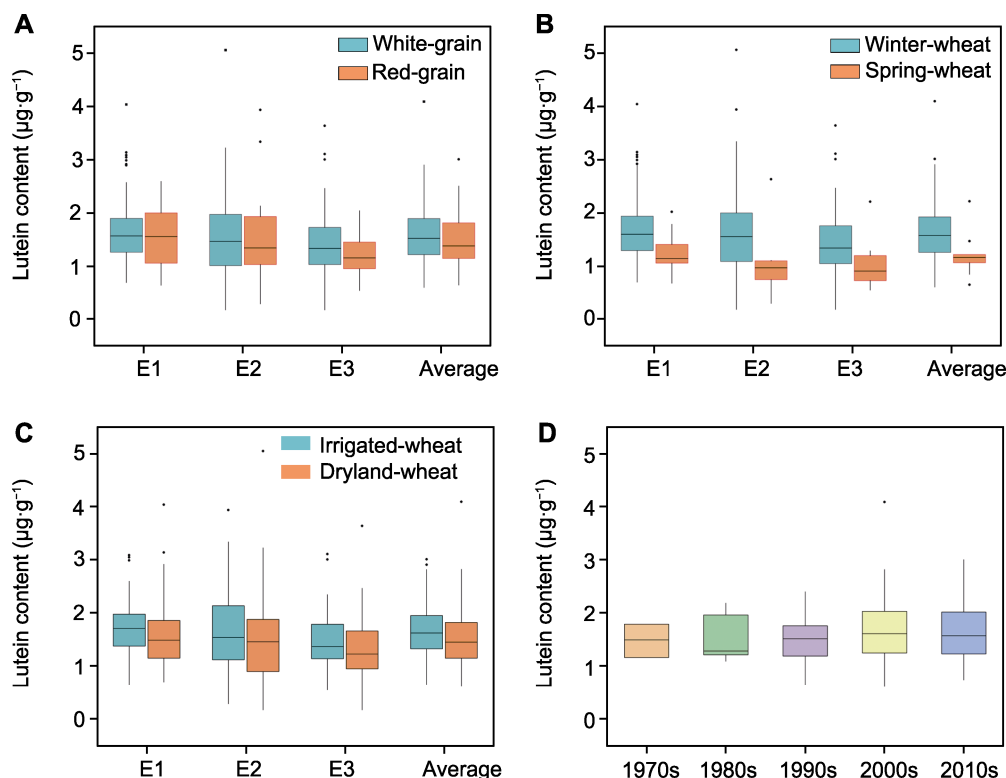


图2 不同环境小麦品种的叶黄素含量水平及地域分布

(A) 3种环境下小麦品种的叶黄素含量分布; (B) 不同地域品种的叶黄素含量分布。E1、E2和E3同表3。

**Figure 2** The lutein contents and the effect of geographic distribution of wheat accessions from different environments

(A) Lutein contents of wheat genotypes under different environments; (B) Effect of geographic distribution on lutein content. E1, E2 and E3 are the same as shown in Table 3.



**图3** 不同因素(粒色(A)、冬春性(B)、水旱品种类型(C)和育成年代(D))对小麦叶黄素含量的影响  
E1、E2和E3同表3。\* $P<0.05$ ; \*\* $P<0.01$

**Figure 3** Lutein contents effected by grain color (A), winter/spring types (B), irrigated/dryland types (C) and released years (D)  
E1, E2 and E3 are the same as shown in Table 3. \* $P<0.05$ ; \*\* $P<0.01$

主要分为旱地和水地两种,不同环境下水地品种叶黄素含量均高于旱地品种,其中E1和E2环境下水旱品种的含量差异显著(图3C),原因可能是水地品种普遍较旱地品种成熟期晚,灌浆期长有利于叶黄素的积累,这与冬性品种高于春性品种的结果一致。分析不同年代育成品种叶黄素含量,发现叶黄素含量在选育过程中无明显变化,表明叶黄素在山西小麦育种历程中并未受到人工和自然选择(图3D)。

## 2.5 农艺性状与叶黄素含量的关系

目前,农艺性状对叶黄素含量影响的研究较少,仅有千粒重与含量呈负相关的报道(Groth et al., 2020)。为此,我们系统研究了株高、穗长、穗颈和穗粒数等13个主要农艺性状对叶黄素含量的影响,结果表明株高和抽穗期对叶黄素含量的影响较大,均呈显著负相关,说明高秆品种的叶黄素含量趋于降低;早抽穗品种含量趋于增加,这可能与灌浆期长有关;对籽粒

性状分析后,发现仅在E2和BLUP中粒宽与叶黄素含量呈显著负相关(表4)。

## 2.6 叶黄素全基因组关联分析结果

利用MLM模型对叶黄素含量进行GWAS分析,定位到9个显著关联的SNP标记(MTAs),分布在1B、3A和7A染色体上。在E1中定位到位于7A染色体上的4个MTAs(图4A);在E2中定位到3个MTAs,分别位于3A和7A染色体(图4B);在E3中定位到1个MTAs,位于7A染色体(图4C);在BLUP条件下,定位到6个MTAs,分别位于1B、3A和7A染色体(图4D)。根据每条染色体的LD区间大小,9个MTAs实际为4个QTL位点,分别为 $QLuc.1B$ 、 $QLuc.3A$ 、 $QLuc.7A.1$ 以及 $QLuc.7A.2$ (表5)。其中 $QLuc.7A.1$ 在各种环境下均可检测到。

将4个位点显著关联且稳定的SNP标记序列在网站(<https://www.wheatinitiative.org/iwggsc>)上进行



表4 叶黄素含量与重要农艺性状的相关性

Table 4 Correlation of lutein contents and important agronomic traits

Environment	pH	SL	NS	SIU	HD	FLL	FLW	SN	GNS	GL	GW	GT	TKW
E1	-0.21*	-0.12	-0.12	-0.14	-0.07*	-0.43	-0.03	0.01	0.06	0.14	0.10	0.06	-0.18*
E2	-0.20*	-0.04	-0.16*	-0.16*	-0.10*	0.02	0.08	0.01	0.01	0.07	-0.16*	0.12	0.12
E3	-0.19*	-0.05	-0.13	-0.13	-0.04*	-0.01	0.01	-0.02	0.01	0.09	0.04	0.05	0.05
BLUP	-0.22*	-0.07	-0.14	-0.16*	-0.04*	-0.03	0.08	0.04	0.04	0.10	-0.13*	0.07	-0.23*

E1、E2和E3同表3。SL: 穗长; NS: 穗颈长; SIU: 穗下节间长; HD: 抽穗期; FLL: 旗叶长; FLW: 旗叶宽; SN: 每穗小穗数; GNS: 穗粒数; GL: 粒长; GW: 粒宽; GT: 粒厚; TKW: 千粒重。BLUP: 最佳线性无偏预测。\* $P<0.05$

E1, E2 and E3 are the same as shown in Table 3. SL: Spike length; NS: Spike neck length; SIU: Internodes under spikes; HD: Heading date; FLL: Flag leaf length; FLW: Flag leaf width; SN: Spikelet number per spike; GNS: Grain number per spike; GL: Grain length; GW: Grain width; GT: Grain thickness; TKW: 1 000-kernel weight; BLUP: Best linear unbiased prediction. \* $P<0.05$

BLAST比对, 获得参考基因组序列上的物理区间, 发现 *QLuc.7A.2* 是 *PSY1* 基因所在位置 (Howitt et al., 2009), *QLuc.1B* 是 1B·1R 易位系断点 (Li et al., 2016), 这2个位点均已证明与籽粒叶黄素含量相关; 3A和7A染色体上的2个位点 (*QLuc.3A* 和 *QLuc.7A.1*) 目前尚未见报道, 可能是新的叶黄素相关位点。

## 2.7 讨论

叶黄素占谷物类胡萝卜素(或者黄色素)总量的70%–95%, 因其具有较强的抗氧化和清除氧自由基的能力, 可有效降低肺癌、食道癌、白内障、色素性视网膜炎和心脑血管疾病等的发病率, 选育富含叶黄素的小麦品种备受关注 (Ronen et al., 2000; Tracewell et al., 2001; Gann and Khachik, 2003; Hadley et al., 2003; Harjes et al., 2008)。当前叶黄素测定方法主要有紫外-可见分光光度法、红外光谱法和高效液相色谱法等 (何卿等, 2018)。紫外-分光光度法易操作且对提取条件要求低, 但只能测定类胡萝卜素的总量, 无法检测不同组分含量, 且溶剂种类易造成较大误差。红外光谱法虽不受样品状态限制, 处理简单, 适合大量质控分析, 但灵敏度较低且误差较大。高效液相色谱法分离效果好且选择灵敏性强, 可与多种技术联用, 是目前使用最广泛的叶黄素检测方法, 已应用于果蔬以及作物中不同类胡萝卜素成分的测定 (Calvo, 2005; 刘敏轩和陆平, 2013)。目前, 关于小麦叶黄素含量的报道多见于四倍体小麦, 对六倍体小麦研究较少。由于测量方法和种质来源的差异, 六倍体小麦籽粒叶黄素含量介于  $0.10\text{--}5.80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  之间 (胡瑞波等, 2004; 汪帆等, 2012; Lv et al., 2013; 任得强等, 2014; Li et al., 2016; Paznocht et al., 2018)。

Abdel-Aal等(2002)首次测定了2个六倍体小麦的叶黄素含量为  $2.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 增加份数后平均含量为  $2.01\text{--}2.11\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (Abdel-Aal et al., 2007)。Konopka等(2006)测定了11份小麦的叶黄素, 含量介于  $0.59\text{--}0.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  之间, 同时发现叶黄素约占类胡萝卜素总量的95%。Zhang等(2009)在RIL群体中检测到黄色素含量为  $1.20\text{--}3.51\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Paznocht等(2018)检测来自9个国家共12个六倍体小麦中的叶黄素, 平均含量为  $3.59\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 最高为  $(5.80\pm 0.16)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。本研究测定了3种不同环境下194份小麦的叶黄素平均含量, 分别为  $1.63$ 、 $1.57$  和  $1.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 与前人的研究结果基本一致。Li等(2016)对我国北部冬麦区和长江中下游冬麦区小麦品种进行检测, 发现叶黄素含量品种间相差约5倍, 多样性远低于本研究所用材料, 可能其所用材料多为近年审定品种, 多样性较低。本研究筛选到多个环境中含量均高于  $3.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  的品种, 有河东TX-006、晋麦95号和临远3158, 这些材料可为生物强化品种选育提供种质资源。

目前, 关于小麦不同遗传因素(如冬春性和千粒重)对叶黄素含量的影响已有报道 (Groth et al., 2020), 但所得结论尚不一致, 究其原因可能是检测材料份数较少, 或仅在单个环境(地点)下实验。Konopka等(2006)测定了11份小麦材料, 发现春性品种的叶黄素含量显著高于冬性品种。王亮等(2009)对170个品种黄色素含量的测定发现, 冬性品种含量高于春性品种。本研究结果进一步证明, 冬性品种的叶黄素含量高于春性品种; 此外还发现籽粒颜色及品种类型对叶黄素含量无显著影响。随着人工选择的加强, 地方品种的叶黄素含量高于育成品种, 年代久远的育成品种高于现代选育品种 (Giambanelli et al., 2013;

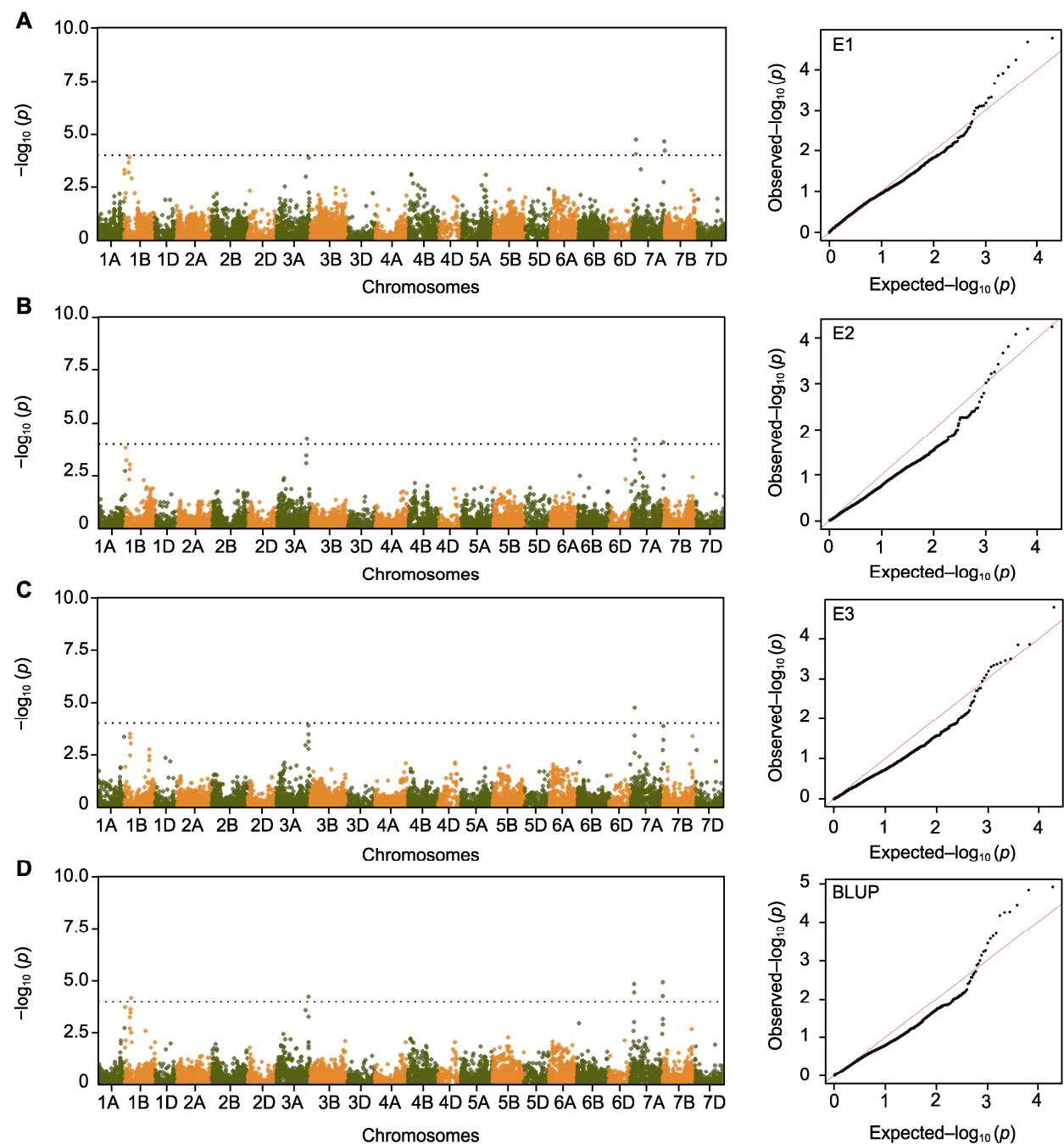


图4 不同环境中叶黄素含量的全基因组关联分析(GWAS)  
E1、E2和E3同表3; BLUP同表4。黑色虚线表示标记-性状关联的显著性阈值。

**Figure 4** The genome-wide association study (GWAS) result of the lutein content from different environments  
E1, E2 and E3 are the same as shown in Table 3; BLUP is the same as shown in Table 4. The black dashed line represent the threshold for the significance of marker-trait association.

Shewry and Sandra, 2015)。而本研究表明山西小麦的叶黄素含量并未随着育种年代发生明显变化, 这可能与21世纪后品种选育才注重面粉白度有关。叶黄素

和生育酚等活性物质的含量与农艺和品质性状相关 (Moore et al., 2005), 其中叶黄素含量与千粒重呈显著负相关 (Groth et al., 2020; Ashokkumar et al.,



表5 全基因组关联分析(GWAS)得到的性状关联位点汇总

Table 5 Summary of associated loci with traits by genome-wide association study (GWAS)

Loci	Chr.	Interval (MB)	Environment	Peak SNP	P-value	R <sup>2</sup> (%)
<i>QLuc.1B</i>	1B	135.25–158.25	BLUP	<i>1B_146746777</i>	6.70E <sup>-05</sup>	5.78
<i>QLuc.3A</i>	3A	648.92–660.63	BLUP	<i>3A_653919298</i>	5.68E <sup>-05</sup>	8.47
			E2	<i>3A_655632858</i>	5.59E <sup>-05</sup>	7.74
<i>QLuc.7A.1</i>	7A	75.63–95.65	E1, E2, BLUP	<i>7A_85627950</i>	6.30E <sup>-05</sup>	6.32
			E1, E3, BLUP	<i>7A_85658392</i>	4.84E <sup>-05</sup>	10.95
<i>QLuc.7A.2</i>	7A	729.71–765.19	E2	<i>7A_739708412</i>	4.08E <sup>-05</sup>	12.28
			E1	<i>7A_741083088</i>	4.23E <sup>-05</sup>	10.03
			BLUP	<i>7A_741778749</i>	4.92E <sup>-05</sup>	10.43
			BLUP	<i>7A_755187469</i>	4.26E <sup>-05</sup>	11.21

E1、E2和E3同表3; BLUP同表4。E1, E2 and E3 are the same as shown in Table 3; BLUP is the same as shown in Table 4.

2020)。含有1BL·1RS易位系的品种叶黄素含量低(Li et al., 2016)。但籽粒相关性状及其它农艺性状是否也影响叶黄素含量尚不清楚。基于此, 我们系统研究了13个主要农艺性状对叶黄素含量的影响, 发现叶黄素含量除与千粒重显著相关外, 在粒长、粒宽和粒厚等性状中, 仅与粒宽呈显著负相关, 而粒长的遗传力较高(Wang et al., 2012), 暗示今后高叶黄素含量品种选育应倾向于长粒品种。株高、穗长和穗粒数等9个主要农艺性状中, 株高和抽穗期与叶黄素含量呈显著负相关。旱地品种依靠自然降雨, 为保证生物量植株通常较高, 这与旱地品种叶黄素含量低于水地品种的结果一致; 叶黄素含量与抽穗期呈显著负相关, 则说明开花期越早, 籽粒叶黄素含量越高, 可能早抽穗使灌浆时间延长, 导致叶黄素积累较多。今后强化品种选育应选择耐高温且灌浆期长的品种, 种植中采用延长灌浆期的措施不仅有利于叶黄素的积累, 还可获得更高产量。

多年以来, 小麦籽粒叶黄素含量的遗传研究主要集中在四倍体小麦, 对六倍体小麦研究较少, 且主要以黄色素混合物为研究对象。已有研究采用SSR和AFLP标记及90K、660K SNP芯片, 利用硬粒及普通小麦的不同遗传和自然群体, 将影响黄色素的QTL定位在除1D、4D和6D外的染色体上(Elouafi et al., 2001; Pozniak et al., 2007; Patil et al., 2008; Zhang et al., 2008; Reimer et al., 2008; Singh et al., 2009; Blanco et al., 2011; Zhao et al., 2013; Colasuonno et al., 2014, 2017, 2019; Zhai et al., 2016)。其中, 第7同源群上的QTL可解释50%以上的表型变异, 3B和

5B上的QTL可解释12%–20%的表型变异(Mares and Campbell, 2001; Blanco et al., 2011)。此外,  $\epsilon$ -环化酶( $\epsilon$ -LCY1)和八氢番茄红素合成酶(Psy-A1)的小麦同源基因中,  $\epsilon$ -LCY的点突变导致1个保守氨基酸替换, 引起叶黄素含量升高; Psy-A1可变剪接导致编码蛋白提前终止或者移码突变使蛋白失活, 继而影响籽粒叶黄素的积累(Howitt et al., 2009; Dibari et al., 2012; Crawford and Francki, 2013)。叶黄素属于次生代谢产物, 参与植物的生长发育、逆境响应和损伤修复等多种生物学过程, 其合成和降解受许多途径的调节(Demmig-Adams and Adams, 2002; Li et al., 2008; Welsch et al., 2008; Farré et al., 2010)。本研究利用GWAS检测到4个影响小麦叶黄素含量的QTL位点, *QLuc.7A.2*和*QLuc.1B*是已报道的位点(Howitt et al., 2009; Li et al., 2016), *QLuc.3A*和*QLuc.7A.1*是2个新的叶黄素含量相关位点, 可用于开发分子标记, 为今后小麦叶黄素生物强化品种的选育奠定基础。

## 参考文献

- 何卿, 孙国峰, 林秦文, 李晓东, 张金政 (2018). 植物类胡萝卜素提取与分析技术研究进展. 植物学报 53, 700–709.
- 胡瑞波, 田纪春, 吕建华 (2004). 小麦类胡萝卜素含量的稳定性及其与黄碱面条色泽性状的相关性分析. 作物学报 30, 597–601.
- 刘敏轩, 陆平 (2013). 中国谷子育成品种维生素E含量分布规律及其与主要农艺性状和类胡萝卜素的相关性分析. 作物学报 39, 398–408.
- 乔玲, 刘成, 郑兴卫, 赵佳佳, 尚保华, 马小飞, 乔麟轶, 盖红

- 梅, 姬虎太, 刘建军, 张建诚, 郑军 (2018). 小麦骨干亲本临汾5064单元型区段的遗传解析. 作物学报 44, 931–937.
- 任得强, 吴媛媛, 周健, 姜艳, 郑文寅, 张文明, 姚大年 (2014). 小麦品种(系)籽粒类胡萝卜素含量及其与其他品质性状的相关性. 麦类作物学报 34, 868–873.
- 孙善澄, 孙玉, 袁文业, 阎文泽, 裴自友, 张美荣, 白云凤 (1999). 优质黑粒小麦76的选育及品质分析. 作物学报 25, 50–54.
- 汪帆, 郑文寅, 黄建华, 王冠球, 崔文礼, 张文明, 姚大年 (2012). 20个小麦品种(系)籽粒LOX活性和类胡萝卜素含量及全麦粉色泽的研究. 麦类作物学报 32, 68–73.
- 王光瑞, 周桂英, 王瑞 (1997). 焙烤品质与面团形成和稳定时间相关分析. 中国粮油学报 12(3), 1–6.
- 王亮, 穆培源, 徐红军, 庄丽, 桑伟, 聂迎彬, 韩新年, 邹波 (2009). 新疆小麦品种黄色素含量基因(*Psy-A1*)等位变异的分子检测. 麦类作物学报 29, 782–786.
- 王秋叶, 张建诚, 姚景珍 (1999). 河东乌麦526品种资源营养学评价. 山西农业科学 27(3), 18–21.
- 徐兆飞 (2006). 山西小麦. 北京: 中国农业出版社. pp. 25–27.
- 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 葛川, 乔麟轶, 张树伟, 闫素仙, 郑兴卫, 郑军 (2021). 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析. 作物学报 47, 714–727.
- 朱金宝, 刘广田, 张树榛 (1995). 基因型和环境对小麦烘烤品质的影响. 作物学报 21, 679–684.
- Abdel-Aal ESM, Young JC, Rabalski I, Hucl P, Fregeau-Reid J (2007). Identification and quantification of seed carotenoids in selected wheat species. *J Agric Food Chem* 55, 787–794.
- Abdel-Aal ESM, Young JC, Wood PJ, Rabalski I, Hucl P, Falk D, Fregeau-Reid J (2002). Einkorn: a potential candidate for developing high lutein wheat. *Cereal Chem* 79, 455–457.
- Ashokkumar K, Govindaraj M, Karthikeyan A, Shobhana VG, Warkentin TD (2020). Genomics-integrated breeding for carotenoids and folates in staple cereal grains to reduce malnutrition. *Front Genet* 11, 414.
- Blanco A, Colasuonno P, Gadaleta A, Mangini G, Schiavulli A, Simeone R, Digesù AM, De Vita P, Mastrangelo AM, Cattivelli L (2011). Quantitative trait loci for yellow pigment concentration and individual carotenoid compounds in durum wheat. *J Cereal Sci* 54, 255–264.
- Calvo MM (2005). Lutein: a valuable ingredient of fruit and vegetables. *Crit Rev Food Sci Nutr* 45, 671–696.
- Colasuonno P, Gadaleta A, Giancaspro A, Nigro D, Giove S, Incerti O, Mangini G, Signorile A, Simeone R, Bianco A (2014). Development of a high-density SNP-based linkage map and detection of yellow pigment content QTLs in durum wheat. *Mol Breed* 34, 1563–1578.
- Colasuonno P, Lozito ML, Marcotuli I, Nigro D, Giancaspro A, Mangini G, De Vita P, Mastrangelo AM, Pecchioni N, Houston K, Simeone R, Gadaleta A, Bianco A (2017). The carotenoid biosynthetic and catabolic genes in wheat and their association with yellow pigments. *BMC Genomics* 18, 122.
- Colasuonno P, Marcotuli I, Blanco A, Maccaferri M, Condorelli GE, Tuberosa R, Parada R, De Camargo AC, Schwember AR, Gadaleta A (2019). Carotenoid pigment content in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*): an overview of quantitative trait loci and candidate genes. *Front Plant Sci* 10, 1347.
- Crawford AC, Francki MG (2013). *Lycopene- $\epsilon$ -cyclase* (*e-LCY3A*) is functionally associated with quantitative trait loci for flour  $b^*$  colour on chromosome 3A in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Mol Breed* 31, 737–741.
- Demmig-Adams B, Adams III WW (2002). Antioxidants in photosynthesis and human nutrition. *Science* 298, 2149–2153.
- Dibari B, Murat F, Chosson A, Gautier V, Poncet C, Lecomte P, Mercier I, Bergès H, Pont C, Blanco A, Salse J (2012). Deciphering the genomic structure, function and evolution of carotenogenesis related phytoene synthases in grasses. *BMC Genomics* 13, 221.
- Digesù AM, Platani C, Cattivelli L, Mangini G, Bianco A (2009). Genetic variability in yellow pigment components in cultivated and wild tetraploid wheats. *J Cereal Sci* 50, 210–218.
- Elouafi I, Nachit MM, Martin LM (2001). Identification of a microsatellite on chromosome 7B showing a strong linkage with yellow pigment in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Hereditas* 135, 255–261.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO (2017). The state of food security and nutrition in the world 2017: building resilience for peace and food security. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. pp. 14–15.
- Farré G, Sanahuja G, Naqvi S, Bai C, Capell T, Zhu CF, Christou P (2010). Travel advice on the road to carotenoids in plants. *Plant Sci* 179, 28–48.
- Gann PH, Khachik F (2003). Tomatoes or lycopene versus prostate cancer: is evolution anti-reductionist? *J Natl Cancer Inst* 95, 1563–1565.
- Giambanelli E, Ferioli F, Koçaoglu B, Jorjadze M, Alexie-

- va I, Darbinyan N, D'antuono LF (2013). A comparative study of bioactive compounds in primitive wheat populations from Italy, Turkey, Georgia, Bulgaria and Armenia. *J Sci Food Agric* **93**, 3490–3501.
- Groth S, Wittmann R, Longin CFH, Böhm V (2020). Influence of variety and growing location on carotenoid and vitamin E contents of 184 different durum wheat varieties (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) in Germany. *Eur Food Res Technol* **246**, 2079–2092.
- Hadley CW, Clinton SK, Schwartz SJ (2003). The consumption of processed tomato products enhances plasma lycopene concentrations in association with a reduced lipoprotein sensitivity to oxidative damage. *J Nutr* **133**, 727–732.
- Harjes CE, Rocheford TR, Bai L, Brutnell TP, Kandianis CB, Sowinski SG, Stapleton AE, Vallabhaneni R, Williams M, Wurtzel ET, Yan JB, Buckler ES (2008). Natural genetic variation in *lycopene epsilon* cyclase tapped for maize biofortification. *Science* **319**, 330–333.
- Hidalgo A, Brandolini A (2014). Nutritional properties of einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.). *J Sci Food Agric* **94**, 601–612.
- Howitt CA, Cavanagh CR, Bowerman AF, Cazzonelli C, Rampling L, Mimica JL, Pogson BJ (2009). Alternative splicing, activation of cryptic exons and amino acid substitutions in carotenoid biosynthetic genes are associated with lutein accumulation in wheat endosperm. *Funct Integr Genomics* **9**, 363–376.
- Institute of Medicine (US) Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds (2000). Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids. Washington (DC): National Academies Press (US). pp. 143–151.
- Konopka I, Czaplicki S, Rotkiewicz D (2006). Differences in content and composition of free lipids and carotenoids in flour of spring and winter wheat cultivated in Poland. *Food Chem* **95**, 290–300.
- Li FQ, Vallabhaneni R, Wurtzel ET (2008). *PSY3*, a new member of the phytoene synthase gene family conserved in the Poaceae and regulator of abiotic stress-induced root carotenogenesis. *Plant Physiol* **146**, 1333–1345.
- Li LH, Lee JCY, Leung HH, Lam WC, Fu ZJ, Lo ACY (2020). Lutein supplementation for eye diseases. *Nutrients* **12**, 1721.
- Li WS, Zhai SN, Jin H, Wen WE, Liu JD, Xia XC, He ZH (2016). Genetic variation of carotenoids in Chinese bread wheat cultivars and the effect of the 1BL.1RS translocation. *Front Agric Sci Eng* **3**, 124–130.
- Lv JL, Lu YJ, Niu YG, Whent M, Ramadan MF, Costa J, Yu LL (2013). Effect of genotype, environment, and their interaction on phytochemical compositions and antioxidant properties of soft winter wheat flour. *Food Chem* **138**, 454–462.
- Mares DJ, Campbell AW (2001). Mapping components of flour and noodle colour in Australian wheat. *Aust J Agric Res* **52**, 1297–1309.
- Moore J, Hao ZG, Zhou KQ, Luther M, Costa J, Yu LL (2005). Carotenoid, tocopherol, phenolic acid, and antioxidant properties of Maryland-grown soft wheat. *J Agric Food Chem* **53**, 6649–6657.
- Patil RM, Oak MD, Tamhankar SA, Sourdille P, Rao VS (2008). Mapping and validation of a major QTL for yellow pigment content on 7AL in durum wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum*). *Mol Breed* **21**, 485–496.
- Paznocht L, Kotíková Z, Šulc M, Lachman J, Orsák M, Eliášová M, Martinek P (2018). Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains. *Food Chem* **240**, 670–678.
- Pozniak CJ, Knox RE, Clarke FR, Clarke JM (2007). Identification of QTL and association of a phytoene synthase gene with endosperm colour in durum wheat. *Theor Appl Genet* **114**, 525–537.
- Reimer S, Pozniak CJ, Clarke FR, Clarke JM, Somers DJ, Knox RE, Singh AK (2008). Association mapping of yellow pigment in an elite collection of durum wheat cultivars and breeding lines. *Genome* **51**, 1016–1025.
- Ronen G, Carmel-Goren L, Zamir D, Hirschberg J (2000). An alternative pathway to  $\beta$ -carotene formation in plant chromoplasts discovered by map-based cloning of *beta* and *old-gold* color mutations in tomato. *Proc Natl Acad Sci USA* **97**, 11102–11107.
- Shewry PR, Sandra H (2015). Do “ancient” wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? *J Cereal Sci* **65**, 236–243.
- Singh A, Reimer S, Pozniak CJ, Clarke FR, Clarke JM, Knox RE, Singh AK (2009). Allelic variation at *Psy1-A1* and association with yellow pigment in durum wheat grain. *Theor Appl Genet* **118**, 1539–1548.
- Tracewell CA, Vrettos JS, Bautista JA, Frank HA, Brudvig GW (2001). Carotenoid photooxidation in photosystem II. *Arch Biochem Biophys* **385**, 61–69.
- Wang LF, Ge HM, Hao CY, Dong YS, Zhang XY (2012). Identifying loci influencing 1 000-kernel weight in wheat by microsatellite screening for evidence of selection during

breeding. *PLoS One* **7**, e29432.

**Welsch R, Wüst F, Bär C, Al-Babili S, Beyer P** (2008). A third phytoene synthase is devoted to abiotic stress-induced abscisic acid formation in rice and defines functional diversification of phytoene synthase genes. *Plant Physiol* **147**, 367–380.

**Zhai SN, He ZH, Wen WE, Jin H, Liu JD, Zhang Y, Liu ZY, Xia XC** (2016). Genome-wide linkage mapping of flour color-related traits and polyphenol oxidase activity in common wheat. *Theor Appl Genet* **129**, 377–394.

**Zhang W, Chao S, Manthey F, Chicaiza O, Brevis JC, Echenique V, Dubcovsky J** (2008). QTL analysis of pasta quality using a composite microsatellite and SNP

map of durum wheat. *Theor Appl Genet* **117**, 1361–1377.

**Zhang YL, Wu YP, Xiao YG, He ZH, Zhang Y, Yan J, Zhang Y, Xia XC, Ma CX** (2009). QTL mapping for flour and noodle colour components and yellow pigment content in common wheat. *Euphytica* **165**, 435–444.

**Zhao Y, Sun HY, Wang YY, Pu YY, Kong FM, Li SS** (2013). QTL mapping for the color, carotenoids and polyphenol oxidase activity of flour in recombinant inbred lines of wheat. *Aust J Crop Sci* **7**, 328–337.

**Zheng XW, Qiao L, Liu Y, Wei NC, Zhao JJ, Wu BB, Yang B, Wang JL, Zheng J** (2022). Genome-wide association study of grain number in common wheat from Shanxi under different water regimes. *Front Plant Sci* **12**, 806295.

# Evaluation and Genetic Variation of Grain Lutein Contents in Common Wheat From Shanxi

Bangbang Wu<sup>1†</sup>, Yuqiong Hao<sup>2†</sup>, Shubin Yang<sup>1</sup>, Yuxi Huang<sup>1</sup>, Panfeng Guan<sup>3</sup>, Xingwei Zheng<sup>2</sup>  
Jiajia Zhao<sup>2</sup>, Ling Qiao<sup>2</sup>, Xiaohua Li<sup>2</sup>, Weizhong Liu<sup>1\*</sup>, Jun Zheng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; <sup>2</sup> Key Laboratory of Organic Dry Farming Agriculture of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Jointly Built by Provinces and Departments), Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen 041000, China; <sup>3</sup> School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract** Lutein can effectively reduce incidence of atherosclerosis, diabetes, cancer and multiple eye diseases. The lutein biofortification through food crop has gained more attention with improvement of daily diet. In this paper, 194 Shanxi wheat cultivars planted in three environments were used to extract lutein by organic solvent extraction, and the content of lutein in different germplasms was determined by high performance liquid chromatography (HPLC). The broad-sense heritability of lutein content in wheat and its relationship with grain color, winter/spring types, geographical origin, accession types, and main agronomic traits were analyzed, and the genetic loci associated with lutein content were identified through genome-wide association analysis. Results showed that significant variation in lutein contents occurred among Shanxi wheat accessions, the coefficient of variation was 33.12%–48.57%. Genotype was the main factor affecting lutein content. The average lutein content in three environments was 0.67–4.03  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 0.16–5.05  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  and 0.16–3.63  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. The average lutein content of winter types and irrigated-wheat accessions were higher than those of spring types and dryland-wheat, respectively. There was no significant effect of grain color and released years on lutein content. Heading date, plant height and 1 000 kernel weight were significantly negative correlated with lutein content. The other agronomic traits had no significant effect on lutein. Genome-wide association analysis found four major loci related to lutein content on chromosomes 1B, 3A and 7A, among them, *QLuc.3A* and *QLuc.7A.1* are new loci affecting the lutein content. These results provide valuable information for breeding and cultivation of wheat lutein bioaugmentation varieties.

**Key words** wheat, lutein, genetic factor, agronomic traits, genome-wide association study

Wu BB, Hao YQ, Yang SB, Huang YX, Guan PF, Zheng XW, Zhao JJ, Qiao L, Li XH, Liu WZ, Zheng J (2023). Evaluation and genetic variation of grain lutein contents in common wheat from Shanxi. *Chin Bull Bot* **58**, 535–547.

<sup>†</sup> These authors contributed equally to this paper.

\* Authors for correspondence. E-mail: liuwzh@sxnu.edu.cn; sxnkyzj@126.com

(责任编辑: 孙冬花)

附表1 山西小麦审定品种中的叶黄素含量

**Appendix table 1** Content of lutein in approved wheat varieties in Shanxi

<https://www.chinbullbotany.com/fileup/1674-3466/PDF/22-081-1.pdf>

附表 1 山西小麦审定品种中的叶黄素含量

Appendix table 1 Content of lutein in approved wheat varieties in Shanxi

No.	Year of released	Accession type	Grain colors	Winter/Spring types	Origin	Variety	E1 ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	E2 ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	E3 ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
1	1973	旱	白	冬	太原	晋麦 1 (太原 116)	1.56±0.08	1.39±0.03	1.24±0.02
2	1973	旱	白	冬	晋中	晋麦 5	1.69±0.06	1.95±0.09	1.76±0.06
3	1980	水	红	冬	临汾	晋麦 11	2.00±0.08	2.06±0.08	1.65±0.04
4	1980	水	白	冬	太原	晋麦 12	1.55±0.04	0.78±0.04	0.86±0.02
5	1982	旱	白	冬	太原	晋麦 16 (太原 633)	1.88±0.09	2.25±0.11	1.79±0.10
6	1982	旱	白	春	吕梁	晋麦 17	1.26±0.03	0.74±0.01	0.85±0.05
7	1983	水	白	冬	忻州	晋麦 18	1.13±0.05	1.09±0.05	1.02±0.06
8	1983	水	白	冬	吕梁	晋麦 19	1.29±0.04	1.71±0.08	1.26±0.04
9	1984	水	白	冬	运城	晋麦 20	1.41±0.05	0.70±0.02	1.20±0.05
10	1985	水	白	冬	运城	晋麦 21	2.04±0.08	2.20±0.07	2.03±0.09
11	1985	旱	白	冬	运城	晋麦 22	1.12±0.04	1.07±0.05	1.00±0.05
12	1985	水	白	冬	运城	晋麦 23	2.56±0.07	2.04±0.06	1.81±0.10
13	1987	水	红	冬	长治	晋麦 24	1.06±0.02	1.03±0.03	1.17±0.07
14	1988	水	白	春	吕梁	晋麦 25	1.40±0.07	0.89±0.03	0.90±0.03
15	1989	旱	红	冬	长治	晋麦 27	1.63±0.05	0.82±0.04	1.14±0.07
16	1989	旱	白	冬	太原	晋麦 28	1.66±0.06	1.59±0.03	1.23±0.04
17	1989	旱	白	冬	晋中	晋麦 29	1.31±0.03	1.10±0.05	1.01±0.06
18	1990	水	白	冬	临汾	晋麦 30	1.54±0.06	1.91±0.05	1.42±0.03
19	1990	水	白	冬	临汾	晋麦 31	1.24±0.02	1.31±0.05	0.93±0.02
20	1990	水	白	冬	临汾	晋麦 32	1.67±0.08	2.31±0.12	1.65±0.07
21	1990	旱	白	冬	临汾	晋麦 33	1.82±0.03	1.79±0.06	1.69±0.02
22	1990	水	白	冬	临汾	晋麦 35	2.57±0.04	2.53±0.05	2.07±0.05
23	1991	旱	白	冬	临汾	晋麦 36	1.44±0.07	0.73±0.01	—
24	1991	水	白	冬	临汾	晋麦 37	1.79±0.04	2.24±0.06	1.99±0.10
25	1991	旱	白	冬	吕梁	晋麦 38 (吕旱 189)	1.18±0.04	0.81±0.02	1.07±0.02
26	1991	旱	白	冬	吕梁	晋麦 39 (旱选 11)	1.71±0.06	1.72±0.04	1.23±0.04
27	1991	旱	白	冬	吕梁	晋麦 40 (旱选 12)	1.60±0.03	2.24±0.09	1.41±0.02



28	1992	水	白	冬	临汾	晋麦 41 (临汾 6010)	1.77±0.04	1.21±0.06	1.40±0.04
29	1992	旱	白	冬	长治	晋麦 42 (长 86-3768)	2.14±0.09	—	2.28±0.07
30	1992	旱	白	冬	吕梁	晋麦 44 (吕旱 133)	1.48±0.07	1.22±0.06	1.16±0.06
31	1992	旱	白	冬	太原	晋麦 43 (88-10γ)	1.09±0.05	0.58±0.01	0.70±0.01
32	1993	水	白	冬	临汾	晋麦 45 (临汾 7203)	1.70±0.04	1.34±0.05	1.27±0.02
33	1994	旱	白	冬	太原	晋麦 46 (太冬 1 号)	2.39±0.12	2.39±0.10	1.94±0.08
34	1995	旱	白	冬	运城	晋麦 47 (运 91-15)	1.31±0.06	0.92±0.03	0.89±0.05
35	1995	水	红	冬	太原	晋麦 48 (太原 768)	1.99±0.08	1.37±0.06	1.20±0.05
36	1996	水	白	冬	临汾	晋麦 49 (临汾 118)	1.97±0.09	1.45±0.03	1.40±0.07
37	1996	旱	白	冬	运城	晋麦 50 (运丰早 3 号)	1.49±0.06	1.65±0.07	1.13±0.04
38	1996	旱	白	冬	太原	晋麦 51 (太原 408)	2.15±0.05	1.95±0.05	1.64±0.04
39	1996	水	白	冬	晋中	晋麦 52 (TK85-2)	1.44±0.03	1.10±0.03	1.10±0.05
40	1996	旱	红	冬	长治	晋麦 53 (长 4569)	1.48±0.07	—	0.97±0.05
41	1997	旱	白	冬	运城	晋麦 54 (运 92-22)	1.00±0.03	0.97±0.03	1.07±0.04
42	1998	旱	白	冬	运城	晋麦 56 (运丰早 18)	1.79±0.06	1.77±0.04	1.79±0.05
43	1998	旱	白	冬	运城	晋麦 57 (运 91-14)	1.35±0.02	1.07±0.04	1.20±0.06
44	1998	水	白	冬	太原	晋麦 58 (太核 5116)	1.37±0.05	0.87±0.03	0.94±0.02
45	1998	旱	白	冬	晋中	晋麦 59 (91-1260)	1.57±0.04	1.75±0.05	1.59±0.04
46	1999	旱	白	冬	临汾	晋麦 60 (临丰 518)	1.13±0.03	1.09±0.03	—
47	1999	旱	白	冬	运城	晋麦 61 (运丰早 21)	1.31±0.07	0.81±0.03	1.03±0.03
48	1999	水	白	冬	长治	晋麦 62 (长 5022)	1.90±0.06	1.55±0.02	1.48±0.03
49	1999	旱	红	冬	长治	晋麦 63 (长 5848)	2.04±0.07	1.66±0.08	1.83±0.04
50	2000	水	白	冬	临汾	晋麦 65 (临远 28013)	1.78±0.03	0.93±0.04	1.35±0.04
51	2000	水	白	冬	太原	晋麦 66 (太原 610)	1.87±0.03	1.60±0.07	2.12±0.11
52	2000	水	红	冬	太原	晋麦 67 (太原 752)	1.74±0.05	1.79±0.05	1.45±0.06

53	2000	旱	白	冬	吕梁	晋麦 68 (吕旱 1375)	—	1.09±0.04	1.01±0.03
54	2001	旱	白	冬	太原	晋麦 70 (太原 6211)	2.91±0.08	3.18±0.13	2.32±0.07
55	2001	水	白	冬	临汾	晋麦 71 (临汾 126)	2.30±0.08	1.98±0.05	1.75±0.06
56	2002	水	白	冬	临汾	晋麦 72 (临抗 5 号)	2.43±0.06	1.86±0.05	1.70±0.05
57	2002	旱	白	冬	临汾	晋麦 73 (临抗 1 号)	1.89±0.10	2.54±0.03	1.62±0.08
58	2002	水	白	冬	临汾	晋麦 74 (临协 98-1)	1.45±0.03	1.19±0.02	1.13±0.02
59	2002	水	白	冬	吕梁	晋麦 75 (汾 3027)	2.03±0.07	1.54±0.04	1.77±0.11
60	2002	水	白	冬	临汾	临汾 615	2.10±0.05	1.15±0.03	1.41±0.08
61	2002	水	白	冬	运城	运引 1 号(邯 6172)	1.55±0.04	0.92±0.02	1.23±0.04
62	2002	水	白	冬	晋中	晋农 207	1.64±0.03	1.36±0.02	1.15±0.02
63	2002	旱	白	冬	长治	长 6878	1.09±0.06	0.17±0.01	0.90±0.03
64	2002	旱	白	冬	太原	晋太 170	2.18±0.09	2.34±0.08	—
65	2003	水	白	冬	临汾	临优 145	1.51±0.06	1.58±0.07	1.53±0.07
66	2003	水	白	冬	临汾	临汾 138	1.16±0.03	1.18±0.02	0.93±0.05
67	2003	旱	白	冬	长治	长 6154	1.95±0.07	1.68±0.05	1.76±0.09
68	2003	旱	白	冬	运城	河东 TX-006	4.03±0.12	5.05±0.25	3.63±0.12
69	2004	旱	白	冬	临汾	临丰 3 号(临旱 536)	1.83±0.10	2.58±0.09	1.88±0.11
70	2003	水	白	冬	太原	晋太 65	1.90±0.04	2.69±0.08	1.68±0.07
71	2004	水	白	冬	临汾	临远 3158 (临远 3158 系选)	3.04±0.12	3.01±0.08	3.00±0.10
72	2004	旱	白	冬	临汾	临抗 11 号	1.63±0.07	1.73±0.09	1.38±0.07
73	2004	旱	白	冬	晋城	泽优 2 号(晋麦 76)	2.89±0.07	—	2.46±0.10
74	2004	水	紫	冬	太原	冬黑 1 号	1.64±0.07	2.17±0.08	1.89±0.10
75	2004	水	兰	冬	运城	运黑 28 号(运 99W28)	2.11±0.08	1.29±0.05	1.21±0.06
76	2004	旱	紫	冬	太原	冬黑 10 号	2.49±0.06	2.68±0.07	2.13±0.04

77	2005	水	白	冬	临汾	临优 2018	2.26±0.12	2.25±0.04	2.23±0.13
78	2005	水	白	冬	临汾	临优 2069	2.20±0.09	2.51±0.13	1.80±0.04
79	1974	旱	红	春	忻州	晋春 3 号(忻春矮 2 号)	—	1.09±0.02	1.01±0.04
80	1996	水	白	春	大同	晋春 13 (晋偃 794-7)	0.97±0.03	0.96±0.01	0.72±0.03
81	2004	水	红	春	大同	晋春 15 号(同麦 878-80)	1.05±0.04	1.09±0.04	1.19±0.05
82	2005	旱	白	冬	运城	运早 2335 (原名“运早早 23-35”)	0.95±0.03	0.30±0.01	0.89±0.02
83	2005	旱	白	冬	长治	长 6359	0.69±0.02	0.16±0.01	0.16±0.01
84	2005	旱	白	冬	长治	长麦 5079 (原名“长治 00-5079”)	1.18±0.05	1.69±0.05	0.91±0.03
85	2005	水	白	冬	长治	长 6452	1.91±0.09	1.90±0.08	1.89±0.10
86	2005	旱	白	冬	长治	长 4640	1.85±0.08	3.22±0.05	2.01±0.08
87	2005	旱	紫	冬	吕梁	汾黑麦 1831	2.32±0.06	1.83±0.10	1.96±0.11
88	2006	旱	白	冬	临汾	晋麦 78 号	1.41±0.07	2.51±0.04	1.63±0.07
89	2006	旱	白	冬	临汾	晋麦 79 号	1.28±0.05	1.57±0.08	1.03±0.04
90	2006	旱	白	冬	临汾	晋麦 80 号	1.35±0.06	1.05±0.02	0.88±0.04
91	2006	水	白	冬	临汾	晋麦 81 号	1.00±0.04	1.14±0.04	0.96±0.03
92	2006	水	白	冬	吕梁	汾 4846	0.94±0.03	1.93±0.06	1.04±0.04
93	2006	水	白	冬	吕梁	汾 4439	1.50±0.03	1.91±0.10	1.55±0.07
94	2007	水	白	冬	临汾	晋麦 82 号	1.08±0.05	0.89±0.03	—
95	2007	水	白	冬	临汾	临汾 8050	1.72±0.03	1.65±0.04	1.21±0.04
96	2007	水	白	冬	临汾	晋麦 83 号	2.40±0.11	2.93±0.04	2.16±0.04
97	2007	水	白	冬	临汾	临汾 6510	1.60±0.07	1.46±0.02	1.51±0.05
98	2007	旱	白	冬	运城	运早 20410	1.74±0.06	1.01±0.04	1.33±0.06

99	2007	水	白	冬	长治	长麦 6686	1.09±0.04	1.55±0.06	0.96±0.04
100	2007	旱	白	冬	长治	长 7016	0.85±0.03	0.49±0.02	0.63±0.04
101	2008	水	白	冬	运城	晋麦 84 号	1.66±0.03	2.16±0.03	1.42±0.07
102	2008	旱	白	冬	临汾	晋麦 85 号	1.02±0.04	1.05±0.03	1.07±0.06
103	2008	水	白	冬	太原	晋太 9923	2.98±0.15	2.61±0.13	2.15±0.04
104	2008	水	白	冬	吕梁	晋麦 86 号	1.54±0.03	1.21±0.06	1.37±0.08
105	2008	水	白	冬	太原	太 5902	1.82±0.07	1.45±0.02	1.27±0.04
106	2008	旱	白	冬	长治	长麦 6735	1.08±0.02	0.82±0.04	0.88±0.03
107	2009	旱	白	冬	临汾	晋麦 87 号	1.12±0.02	1.16±0.02	1.20±0.03
108	2009	旱	白	冬	运城	运早 719	0.85±0.04	0.78±0.02	0.80±0.05
109	2009	旱	白	冬	临汾	晋麦 88 号	1.54±0.08	1.28±0.05	1.48±0.06
110	2009	水	红	冬	晋中	山农 129	2.01±0.09	3.33±0.09	2.04±0.06
111	2009	水	白	冬	太原	太 13606	1.41±0.03	1.58±0.05	1.48±0.02
112	2009	水	红	冬	长治	长麦 5973	1.78±0.04	1.93±0.09	1.23±0.07
113	2009	水	白	冬	长治	长 5222	1.59±0.03	2.16±0.10	—
114	2019	水	白	冬	长治	长麦 6135	1.57±0.07	1.88±0.07	1.26±0.06
115	2010	水	白	冬	临汾	临远 8 号	2.45±0.10	1.59±0.02	1.43±0.02
116	2011	水	白	冬	长治	长麦 251	1.59±0.05	1.17±0.05	1.25±0.06
117	2017	旱	红	冬	长治	长 6197	1.39±0.05	1.18±0.02	1.00±0.05
118	2011	旱	白	冬	长治	长 8744	2.16±0.10	2.89±0.10	1.93±0.08
119	2011	旱	白	冬	临汾	晋麦 90 号(临抗 5069)	2.19±0.08	2.00±0.08	1.67±0.07
120	2011	旱	白	冬	临汾	晋麦 91 号(临旱 6101)	2.17±0.07	2.21±0.11	1.6±0.04
121	2011	旱	白	冬	运城	运早 805	1.18±0.05	1.35±0.03	1.27±0.02
122	2013	旱	白	冬	临汾	晋麦 92 号(临 Y8159)	1.76±0.05	—	1.72±0.04
123	2013	水	白	冬	太原	晋太 182 (晋太 0802)	1.76±0.07	1.96±0.08	1.72±0.07

124	2013	旱	白	冬	长治	长 4853	3.13±0.08	2.16±0.07	2.14±0.10
125	2014	水	白	冬	临汾	晋麦 94 号	2.48±0.12	3.08±0.07	2.25±0.09
126	2014	水	白	冬	临汾	晋麦 95 号	3.08±0.06	3.18±0.10	3.10±0.18
127	2014	水	白	冬	临汾	晋麦 96 号	1.97±0.04	3.08±0.11	2.16±0.07
128	2014	水	白	冬	太原	晋太 102	1.71±0.04	0.92±0.04	1.36±0.05
129	2014	旱	白	冬	临汾	晋麦 97 号	1.62±0.04	1.87±0.04	1.73±0.03
130	2014	旱	白	冬	临汾	晋麦 98 号	2.16±0.03	2.77±0.09	2.12±0.11
131	2014	水	白	春	太原	太春 3473	2.01±0.07	2.62±0.06	2.20±0.06
132	2015	旱	白	冬	临汾	晋麦 99 号(临糯 96046)	—	1.11±0.02	1.01±0.04
133	1974	旱	白	冬	晋中	晋麦 13	1.13±0.02	1.09±0.03	—
134	2003	旱	白	冬	运城	运旱 21-30	1.54±0.05	1.36±0.04	1.44±0.06
135	2016	水	白	冬	山东	良星 67	1.83±0.09	2.15±0.09	1.91±0.03
136	2016	旱	白	冬	运城	运旱 137	2.30±0.12	2.23±0.10	1.79±0.10
137	2016	水	红	冬	太原	太 113	2.58±0.09	3.93±0.20	—
138	2016	水	白	冬	太原	晋作 80	1.31±0.03	0.74±0.04	1.06±0.03
139	2016	水	白	冬	太原	晋太 114	1.56±0.06	2.96±0.07	2.10±0.08
140	2016	水	红	冬	长治	长 6794	2.59±0.13	2.13±0.07	1.90±0.05
141	2017	旱	白	冬	长治	长 7080	2.03±0.10	1.46±0.05	1.31±0.03
142	2016	旱	白	冬	太原	晋太 1310	1.52±0.05	1.63±0.05	1.55±0.02
143	2016	旱	白	冬	长治	长 6990	1.62±0.06	1.60±0.05	1.15±0.07
144	2016	水	白	冬	长治	中麦 247	1.82±0.08	1.47±0.07	1.58±0.09
145	2006	旱	白	冬	临汾	临旱 6 号	1.40±0.03	0.71±0.01	1.04±0.03
146	2017	旱	白	冬	临汾	临 Y8161	1.20±0.06	1.70±0.08	1.44±0.06
147	2013	旱	白	冬	临汾	临 y8168	1.46±0.05	0.69±0.02	0.91±0.03

148	2002	旱	白	冬	北京	中旱 110	—	1.11±0.02	1.01±0.03
149	2004	旱	白	冬	吕梁	吕旱 1608	1.41±0.04	0.62±0.01	1.01±0.01
150	1997	水	紫	春	太原	小黑麦 76 号	1.78±0.06	1.10±0.02	1.28±0.05
151	2018	水	白	冬	临汾	鲁科 298	1.49±0.04	1.28±0.03	1.33±0.07
152	2017	旱	白	冬	太原	晋太 141	2.23±0.05	1.45±0.05	1.49±0.05
153	2017	水	白	冬	太原	晋太 146	1.74±0.08	1.87±0.03	1.79±0.08
154	2018	旱	白	冬	太原	太 1305	1.87±0.06	1.99±0.08	1.85±0.03
155	2017	水	白	冬	太原	太 412	2.07±0.09	2.66±0.11	2.34±0.04
156	1983	旱	白	冬	临汾	临旱 6210	1.74±0.07	1.63±0.04	1.27±0.03
157	2018	水	红	冬	运城	运 14 观 74	1.84±0.04	1.34±0.05	—
158	2011	水	白	冬	临汾	尧麦 16	1.71±0.06	1.10±0.04	1.34±0.07
159	2017	水	白	冬	石家庄	石农 086	1.57±0.06	1.13±0.03	1.12±0.04
160	2017	水	白	冬	临汾	翔麦 23	1.94±0.04	2.99±0.04	1.78±0.06
161	1980	旱	白	冬	临汾	临汾 7140	1.31±0.04	0.38±0.02	0.72±0.02
162	2018	旱	白	冬	临汾	晋麦 101	0.95±0.03	0.86±0.02	0.89±0.05
163	2018	旱	白	冬	临汾	晋麦 102	1.17±0.05	1.60±0.04	1.38±0.04
164	2009	水	白	冬	晋城	NC206	1.13±0.04	—	1.01±0.05
165	2007	水	白	冬	背景	中麦 175	1.75±0.03	1.45±0.03	1.59±0.06
166	2011	水	白	冬	运城	舜麦 1718	1.16±0.02	0.84±0.04	0.99±0.02
167	2018	旱	白	冬	运城	运旱 1512	1.57±0.07	1.08±0.01	1.33±0.06
168	2017	旱	白	冬	运城	运旱 139-2	0.88±0.03	0.89±0.03	0.92±0.05
169	2016	旱	白	冬	晋城	润麦 2 号	1.04±0.03	1.34±0.03	0.93±0.03
170	2017	旱	白	冬	临汾	翔麦 8156	1.07±0.04	0.93±0.03	0.84±0.04
171	2018	旱	白	冬	临汾	临旱 9 号	1.53±0.04	0.77±0.03	1.21±0.07
172	2018	旱	白	冬	临汾	沃麦 323	1.08±0.02	—	0.78±0.04



173	2018	旱	白	冬	临汾	临 4133	1.43±0.04	1.68±0.08	1.36±0.04
174	2017	旱	白	冬	吕梁	晋麦 104	0.88±0.02	0.36±0.02	0.55±0.02
175	2018	水	红	冬	长治	长 6789	1.18±0.06	1.53±0.07	1.13±0.03
176	2018	水	白	冬	临汾	临 Y7287	0.77±0.02	0.39±0.02	0.53±0.03
177	2018	旱	白	冬	运城	运旱 1411-2	0.77±0.02	1.55±0.08	0.85±0.03
178	1974	水	红	冬	临汾	晋麦 9 号	1.02±0.05	1.14±0.02	0.91±0.03
179	1999	水	红	春	大同	晋春 14	0.67±0.03	0.27±0.01	0.54±0.03
180	2009	水	红	春	太原	晋春 16 号	1.13±0.06	0.27±0.01	0.71±0.02
181	2017	水	白	春	太原	晋春 17 号	1.13±0.06	1.05±0.06	1.05±0.05
182	2006	水	白	冬	运城	运麦 218	0.85±0.02	1.17±0.03	1.15±0.04
183	2018	水	白	冬	运城	运黑 161	0.93±0.04	0.70±0.03	0.81±0.04
184	2018	水	白	冬	运城	运黑 14207	1.46±0.06	1.20±0.02	1.33±0.07
185	2018	水	白	冬	临汾	临 Y8012	0.99±0.03	0.78±0.03	0.87±0.03
186	1981	旱	白	冬	临汾	平阳 1 号	1.92±0.09	1.32±0.03	1.37±0.04
187	2019	旱	白	冬	临汾	中麦 110	0.94±0.05	—	0.97±0.06
188	2022	旱	白	冬	运城	运旱 1818	0.72±0.02	0.55±0.02	0.63±0.04
189	2022	旱	白	冬	长治	长 5804	1.29±0.05	1.89±0.06	1.32±0.05
190	2019	旱	白	冬	临汾	临旱 5325	0.93±0.03	1.01±0.03	0.96±0.03
191	1976	旱	白	冬	临汾	临汾 5144	1.11±0.03	1.27±0.03	1.18±0.03
192	2020	旱	白	冬	临汾	临旱 10 号	1.13±0.05	1.58±0.03	1.16±0.04
193	1972	旱	白	冬	临汾	晋南 14	0.83±0.02	0.85±0.04	0.90±0.04
194	1981	旱	白	冬	临汾	临旱 11	1.14±0.03	1.28±0.06	0.95±0.03