

不同小麦基因型对 γ 射线辐照敏感性的分子解析

韩冰^{1,2}, 古佳玉², 赵林姝², 郭会君², 谢永盾², 赵世荣², 孙云云^{1,2}, 宋希云¹, 刘录祥²

(¹ 青岛农业大学生命科学学院, 青岛 266109; ² 中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程/国家农作物航天诱变技术改良中心, 北京 100081)

摘要: 本研究以 63 份小麦品种(系)的风干种子为材料, 分别利用 0 Gy、100 Gy、150 Gy 和 250 Gy 剂量的⁶⁰Co γ 射线辐照, 通过种子发芽试验和基因表达等方法, 探讨不同小麦基因型间辐射敏感性差异及辐射敏感性相关基因的表达模式。结果表明: 根据苗高损伤效应, 将 63 份不同小麦基因型分为敏感型(核优 1 号、中优 206 和太原 703 等)、较敏感型(早选 10 号、济麦 20 和中麦 175 等)、较钝感型(德抗 961、豫麦 68 和淮麦 20 等)和钝感型(衡观 136、邯 6172 和偃展 4110 等)4 类。所选材料 γ 射线辐照后, 敏感型基因型中 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因诱导表达明显, 钝感型基因型中 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因诱导表达不明显。本研究表明不同小麦基因型间辐射敏感性差异明显且与 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因表达模式有关。

关键词: 小麦; 苗高; *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因表达模式; 辐射敏感性

Molecular Characterization of Radiation Sensitivity of Different Wheat Genotypes Irradiated by γ Rays

HAN Bing^{1,2}, GU Jia-yu², ZHAO Lin-shu², GUO Hui-jun², XIE Yong-dun²,
ZHAO Shi-rong², SUN Yun-yun^{1,2}, SONG Xi-yun¹, LIU Lu-xiang²

(¹ Academy of Life Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/National Center of Space Mutagenesis for Crop Improvement, Beijing 100081)

Abstract: In this paper, sixty three wheat genotypes irradiated by γ rays with the doses of 0 Gy, 100 Gy, 150 Gy and 250 Gy, respectively were used to investigate the difference of radiation sensitivity and its molecular mechanism through germination test and gene expression analysis. The results showed that based on the damage effect of seedling height, sixty three wheat genotypes could be divided into four categories: i. e., the sensitive (Heyou 1, Zhongyou 206 and Taiyuan 703 et al), the intermediate sensitive (Hanxuan No. 10, Jimai 20 and Zhongmai 175 et al), the intermediate insensitive (Dekang 961, Yumai 68 and Huaimai 20 et al) and the insensitive (Hengguan 136, Han 6172 and Yanzhan 4110 et al). The analysis of expression pattern of the *TaKu70* and *TaKu80* gene responded to the γ ray irradiation revealed that there were significant differences between the induced expression amounts of the control group and those of treatment group among the sensitive genotypes. While there were no significant differences in the insensitive genotypes. It was concluded that the radiation sensitivity was significantly different in the sixty three wheat genotypes, and the differences upon radiation sensitivity were significantly associated with expression pattern of the *TaKu70* and *TaKu80* gene responded to the γ rays.

Key words: wheat; seedling height; expression pattern of *TaKu70* and *TaKu80* gene; radiation sensitivity

收稿日期: 2014-05-07 修回日期: 2014-05-22 网络出版日期: 2014-10-16

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20141016.1101.003.html>

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(“863”计划)项目(2012AA101202、2012AA101105); 国家自然科学基金项目(11305261); 农业部农业公益行业科研专项(201103007); 国际原子能机构项目(CRP15651 和 RAS5056)

第一作者研究方向为小麦诱变突变与生物技术育种。E-mail: hab_1011@163.com

通信作者: 刘录祥, 主要从事作物诱变突变与生物技术育种。E-mail: luxiang@263.net.cn

小麦是关系国计民生的最重要的粮食作物之一,不断提高品种生产能力,增加小麦产量对于保障国家粮食安全至关重要。近年来小麦育种中种质材料的重复利用以及遗传多样性的逐渐降低^[1],在一定程度上阻碍了小麦品种改良的进程。辐射诱变育种技术是核技术在农业中的重要应用,在作物种质资源创制和品种培育方面已卓具成效。据联合国粮农组织/国际原子能机构不完全统计,目前世界上 70 多个国家 200 多种植物中,通过诱变育种手段已育成了 3200 多个商用品种,其中约 79% 来源于 γ 射线诱变,在中国则达 82%^[2],但相对于实践应用的突出成就,有关核辐射诱变机理的研究仍然较少,品种辐射敏感性的研究将可能成为解析诱变机理的重要途径之一。

辐射敏感性是指细胞、组织、器官和机体或任何生命物质对辐照损伤作用的相对敏感程度,即在辐照条件完全相同的情况下,同一辐射效应发生的速度和严重程度^[3]。辐射敏感性有形态、生理生化和细胞学等多种评价指标。发芽特性、幼苗性状和成株性状是评价辐射敏感性的形态学指标^[4-5]。王庆^[6]在 γ 射线辐照后的京 411 和济麦 22 幼苗期观察到苗高在对照组和处理组间存在极显著差异, J. D. Soriano^[7]和 M. Inoue 等^[8]根据苗高半致矮剂量(HD_{50})将水稻和大麦品种分别分为敏感型、钝感型和中间型 3 类。冯志杰^[9]把各种辐射敏感性指标(苗高损伤、子粒形态、产量和存活率等)综合后将普通小麦分为极敏感型、极迟钝型、敏感型、迟钝型和中间型 5 类,并认为不同小麦品种间辐射敏感性存在差异,且辐射敏感性呈正态分布。

同一物种内不同品种间的辐射敏感性存在差异,其差异原因有多种解释。值得注意的是辐射导致的 DNA 损伤^[10],其主要包括 DNA 单链断裂(SSB, single-stranded break)和 DNA 双链断裂(DSBs, double-stranded breaks)等^[11]。在 DSBs 的修复途径中, *Ku70* 和 *Ku80* 基因编码的 Ku70 和 Ku80 蛋白形成异源二聚体 Ku 蛋白发挥着重要作用^[12-13]。二聚体中任一蛋白亚基的突变或者损坏,都会导致修复过程的中断或者减弱^[14-17],进而导致植物辐射敏感性的变化。P. Bundock 等^[18]用拟南芥 *Ku70* 基因的 T-DNA 缺失突变体证实了 *Ku70* 基因缺失会导致机体对电离辐射处理引起超敏性反应。在小麦 *Ku* 基因的研究中,朱彩霞等^[19]首次从小麦中克隆了 *Ku70* 和 *Ku80* 基因的 cDNA 序列,并命名为 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因。J. Y. Gu 等^[20]首次从小麦

中克隆了 *TaKu70* 和 *TaKu80* 的基因组序列,并通过酵母双杂交和凝胶阻滞电泳等试验证实小麦中 *TaKu70* 和 *TaKu80* 蛋白在 DNA 的损伤修复中发挥着重要作用,且发现在试验品种中 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因被 γ 射线诱导表达明显。王庆^[6]以 γ 射线、质子和中子等不同辐照方式处理的京 411 和济麦 22 为材料,研究表明不同辐照方式下 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的响应模式不同。崔孟等^[21]以 γ 射线处理的邯 6172 和京 411 为材料,结果表明不同品种小麦 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因对 γ 射线的响应模式不同。

本研究以幼苗苗高损伤率作为评价辐射敏感性的一个指标,探讨了 63 份不同小麦品种(系)间辐射敏感性的差异,并通过 qPCR 荧光定量试验,对选定的敏感型和钝感型品种 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的表达模式进行分析,旨在探索小麦品种 γ 辐射敏感性与 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的表达模式之间的联系。

1 材料与方法

1.1 植物材料

本研究所用材料为 63 份小麦品种(系)的风干种子,包括育成品种 48 份和育成高稳品系 15 份。

1.2 试验方法

1.2.1 水分平衡与辐照处理 以甘油/水 = 1:1 对比对选定材料进行水分平衡,以期达到含水量均为 13%。在北京大学辐照中心进行种子的辐照处理,剂量分别为 0 Gy、100 Gy、150 Gy 和 250 Gy,剂量率为 7.5 Gy/min,每个剂量重复 3 次,其中 0 Gy(未辐照)的样品作为对照。

1.2.2 发芽试验 辐照后的种子每个基因型分剂量取 90 粒,设 3 次重复。4℃ 蒸馏水浸种 16 h,室温条件下进行水培发芽试验。5 d 后调查苗高,每个剂量苗高测量值记作 H_n ($n = 0, 100, 150$ 和 250 Gy),根据公式 $\Delta H_n = (H_0 - H_n)/H_0$,其中 ΔH_n 为 5 d 期幼苗高度损伤率。一般情况下, ΔH_n 越大, γ 射线对植株的损伤效应越大,该品种则越敏感,反之,则越钝感。如果为负值,则说明 γ 射线对该品种的生长具有促进效应^[7-8]。

1.2.3 RNA 的提取及实时荧光定量 PCR 据敏感性分类选出 16 份试验材料,4℃ 蒸馏水浸种 16 h,然后转移到恒温培养箱,恒温 21℃ 条件下进行水培发芽试验。5 d 后取适量叶片,每个剂量设 3 个重复,采取 TRNzol^{A+} (TIANGEN, DP421)法(具体方

法见操作手册)提取 RNA,1% 的琼脂糖凝胶检测其完整性,条带亮度 28s:18s = 2:1 认为完整性良好。Nanodrop2000(Thermo, USA)检测其 RNA 纯度。利用 iScript™ cDNA Synthesis Kit, SsoFast™ EvaGreen^R supermix (BIO-RAD, 170-8891, USA) 试剂盒和

CFX96(BIO-RAD, USA) 荧光定量仪进行 qPCR (*Actin*, *18s*), 每个基因每个剂量设 3 个技术重复。所用引物如表 1, CFX96 Real-time System (BIO-RAD, USA) 分析系统分析结果。软件输出每个基因型每个剂量的表达分析柱状图及其数值。

表 1 实时荧光定量 PCR 所用引物序列

Table 1 Sequence of primer using in the Quantitative Real-time PCR

引物名称 Primer name	序列(5'→3') Sequence(5'→3')	目的 Object
<i>TaKu70</i> QF	CTACCTCATAGACGCCTCGC	目的基因 <i>TaKu70</i> 的 F 引物
<i>TaKu70</i> QR	GCAACTTCATCACGGGATCT	目的基因 <i>TaKu70</i> 的 R 引物
<i>TaKu80</i> QF	GGCTGGTTCTGCTGCTGGATG	目的基因 <i>TaKu80</i> 的 F 引物
<i>TaKu80</i> QR	GCCAACCTCGTCGCTCCTATG	目的基因 <i>TaKu80</i> 的 R 引物
<i>TaActin</i> QF	GTAGGAAATGGCTGACGGTG	内参基因 <i>Actin</i> 的 F 引物
<i>TaActin</i> QR	ATGCTAGGAAAACAGCCCT	内参基因 <i>Actin</i> 的 R 引物
18sQF	CCATCCCTCCGTAGTCTAGCTTCT	内参基因 18s 的 F 引物
18sQR	CCTGTCGGCCAAGGCTATATAC	内参基因 18s 的 R 引物

2 结果与分析

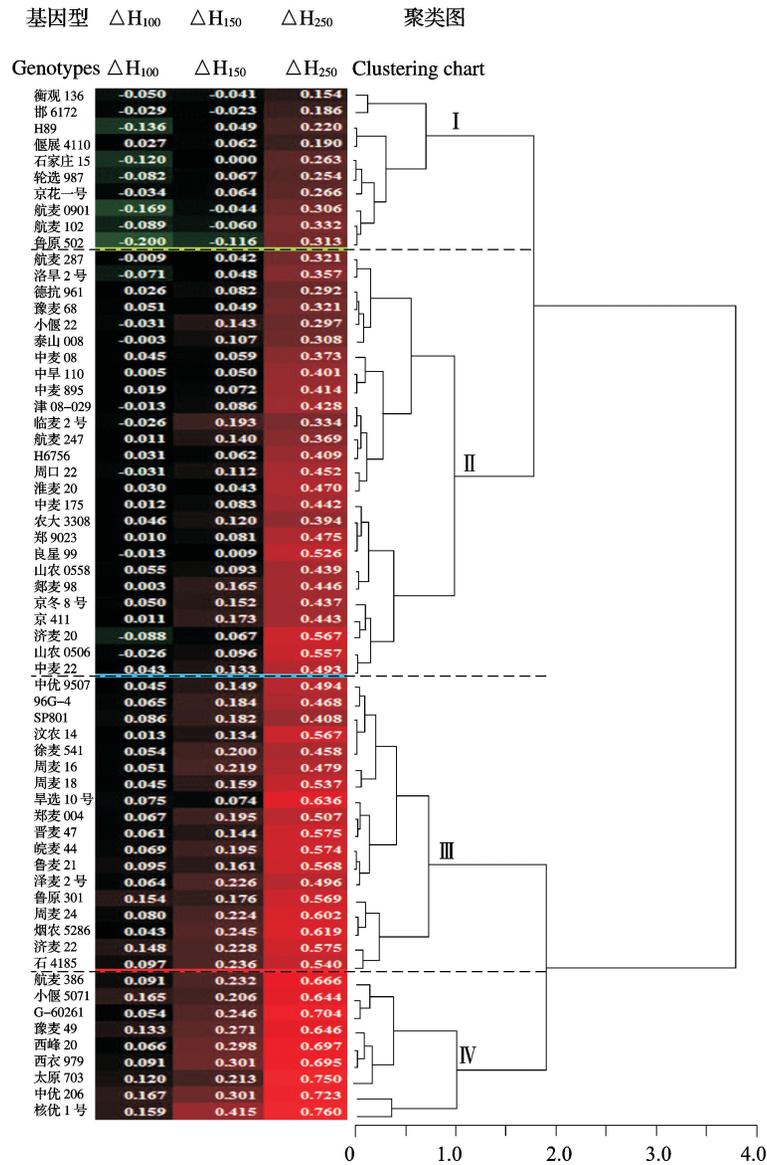
2.1 γ 辐照对不同小麦基因型苗高的损伤效应

如图 1 所示,63 个小麦品种 5 d 期苗高损伤率 ΔH_{100} 、 ΔH_{150} 和 ΔH_{250} 有很大差异。对于 ΔH_{100} (剂量 100 Gy 损伤率), 有 19 个品种的 ΔH_{100} 值为负(衡观 136、邯 6172、H89、航麦 102、航麦 0901 和鲁原 502 等), 其他品种的 ΔH_{100} 值为正值, 其正值多集中在 0~0.167 之间, 其中中优 206、核优 1 号和小偃 5071 的 ΔH_{100} 值分别为 0.167、0.159 和 0.165, 说明在 100 Gy 剂量下 γ 射线的苗高损伤效应不大, 有些品种甚至有促进效应 (ΔH_{100} 值为负)。对于 ΔH_{150} (剂量 150 Gy 时的损伤率), 只有 5 个品种为负值(衡观 136、邯 6172、航麦 102、航麦 0901 和鲁原 502 等), 其他品种的 ΔH_{150} 值则为正值, 多集中在 0~0.415 之间, 其中中优 206、核优 1 号和西农 979 的值分别为 0.301、0.415 和 0.301, 说明当剂量增加到 150 Gy 时, γ 射线对不同品种的损伤效应也在增加, 但少数品种对植株生长仍有促进效应。对于 ΔH_{250} (剂量 250 Gy 损伤率) 无负值存在, 其正值多集中在 0.154~0.760 之间, 核优 1 号 ΔH_{250} 值最大为 0.760, 衡观 136 的最小仅为 0.154, 说明当剂量达到高剂量(250 Gy)时, γ 射线对植株生长的抑制效应更加明显。对 ΔH_{100} 、 ΔH_{150} 和 ΔH_{250} 综合聚类分析将 63 个小麦品种(系)分为 I、II、III、IV 4 类(如图 1 所示)结合上述分析, I 类为钝感型、II 类为较钝感型、III 类为

较敏感型、IV 类为敏感型, IV 类的相应剂量 ΔH_n 大于 I 类的相应剂量 ΔH_n , 而 II 类和 III 类的相应剂量的 ΔH_n 则相当。说明在敏感型品种中 γ 射线对苗高的损伤效应相对较大, 钝感型品种中其损伤效应相对较小。

2.2 γ 射线辐照后小麦品种 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的表达模式分析

如图 2 A、B 所示, γ 辐照后核优 1 号、Sp801、小偃 5071、周麦 18 和西农 979 等敏感型品种, 250 Gy 剂量时, 其 *TaKu70* 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 2.0~3.0 倍, 其中核优 1 号最大达 3.0 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的 1.5~3.5 倍, 其中西农 979 最大达 3.5 倍。在 150 Gy 剂量时, 其 *TaKu70* 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 1.1~1.8 倍, 其中西农 979 最大为 1.8 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的 1.0~2.4 倍, 其中西农 979 最大达 2.4 倍。在 100 Gy 剂量时, 其 *TaKu70* 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 0.8~2.4 倍, 其中 Sp801 最大为 2.4 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的 1.0~1.8 倍, 其中西农 979 最大达 1.8 倍。说明在选定的敏感型品种中, *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的相对表达水平随剂量增加均上调, 即均被 γ 射线诱导表达。高剂量(250 Gy)条件下, 越敏感的品种 *TaKu70* 基因相对表达量就越大, 即诱导表达越明显; 低剂量(100 Gy 和 150 Gy)条件下(除个别品种外), 其 *TaKu70* 和 *TaKu80* 诱导表达量随剂量增加上调幅度相对较小。



基因型所在列显示了 63 份不同的小麦品种名称, ΔH_{100} 、 ΔH_{150} 和 ΔH_{250} 所示 3 列代表不同小麦品种在剂量 100 Gy、150 Gy 和 250 Gy 处理时的苗高损伤率,其背景绿色代表该剂量条件下 γ 射线对植株生长有促进作用,红色代表该剂量对植株生长有抑制作用。色度代表促进或抑制的程度。I、II、III、IV 类代表聚类分析后的 4 个类型,其中分别为: I (绿色横线以上区间) 类为钝感型、II 类为较钝感型(蓝色横线与绿色横线之间的区间)、III 类为较敏感型(红色横线与蓝色横线之间的区间)、IV 类为敏感型(红色横线以下所示区间)

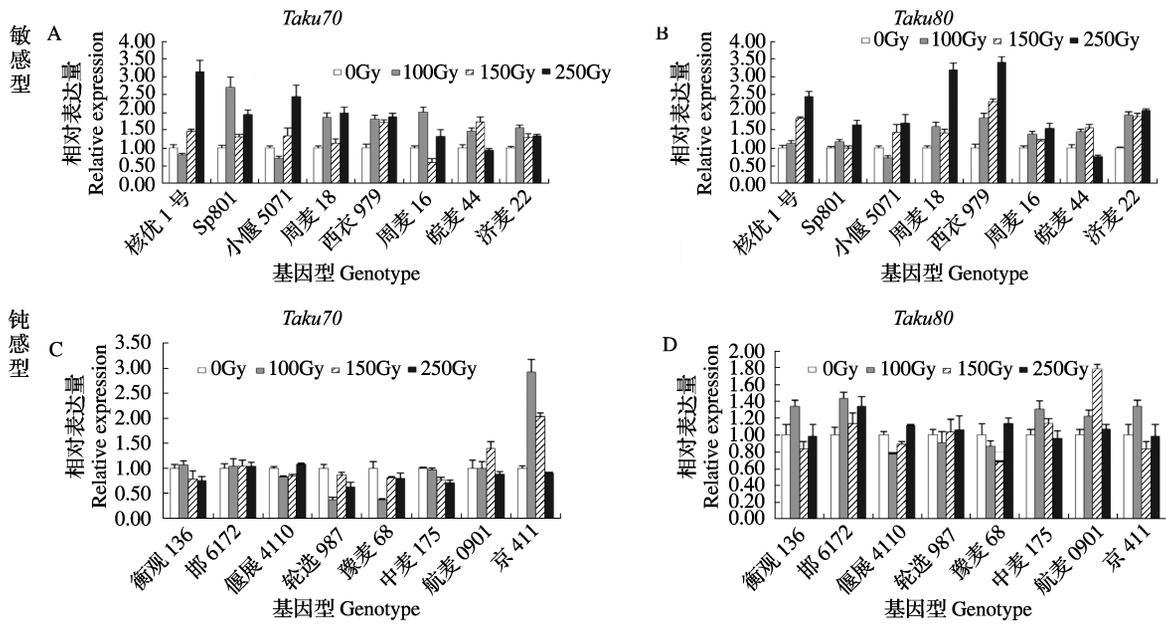
The column named genotypes represents the 63 wheat varieties, the columns named ΔH_{100} , ΔH_{150} , and ΔH_{250} shows the values of seedling height damage in the corresponding condition. The promotion and inhibiting effects are displayed by the green and red background respectively. The degree of color represents the level of the promotion and inhibiting effects in the growing. The Roman number I, II, III and IV represent the four clustering types. The region of I (above the green line) shows the insensitive while the IV (below the red line) shows the insensitive. II (the green line and the blue one) and III (the blue line and the red one) represent the intermediate insensitive and the intermediate sensitive

图 1 63 个不同基因型的苗高损伤聚类结果

Fig. 1 The clustering analysis of the value of seedling height damage in 63 genotypes

如图 2 C、D 所示, γ 辐照后, 衡观 136、邯 6172、偃展 4110、轮选 987 和中麦 175 等钝感型品种, 250 Gy 剂量时其 *TaKu70* 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 0.7 ~ 1.1 倍, 其中轮选 987 最大达 1.1 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的 1.0 ~ 1.3 倍, 其中邯 6172 最大为 1.3 倍。在 150 Gy 剂量时, 其

TaKu70 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 0.8 ~ 1.0 倍, 其中邯 6172 最大为 1 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的 0.7 ~ 1.1 倍, 其中邯 6172 最大为 1.1 倍。在 100 Gy 剂量时, 其 *TaKu70* 基因的相对表达量约为 0 Gy 的 0.4 ~ 1.1 倍, 其中邯 6172 最大为 1.1 倍; 其 *TaKu80* 基因相对表达量约为 0 Gy 的

图2 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的表达模式Fig. 2 The expression pattern of *TaKu70* and *TaKu80* gene

0.8~1.4倍,其中邯6172最大为1.4倍。说明在选定的钝感型品种中,*TaKu70*和*TaKu80*基因的相对表达水平随剂量增加基本不变,高剂量(250 Gy)和低剂量(100 Gy和150 Gy)*TaKu70*和*TaKu80*基因的诱导表达均不明显,即在钝感型品种中,*TaKu70*和*TaKu80*的诱导表达与剂量间无明显依赖关系。京411品种比较特殊,其*TaKu70*基因在低剂量(100 Gy和150 Gy)时诱导表达量为对照组2~3倍,250 Gy基本不被诱导;*TaKu80*基因被诱导表达并不显著。

3 讨论

3.1 小麦基因型间辐射敏感性差异明显

冯志杰^[9]将49个小麦品种分为极敏感型、敏感型、中间型、迟钝型和极迟钝型5类,认为小麦品种间辐射敏感性存在显著差异,并呈正态分布。徐锡虎等^[22]将23个水稻品种(系)分为敏感型、中间型和迟钝型3类,认为不同水稻品种间辐射敏感性存在差异。本研究中将63个小麦基因型分为敏感型(IV)、较敏感型(III)、较钝感型(II)和钝感型(I)4类,不同小麦基因型间辐射敏感性差异明显,植物辐射敏感性差异的原因十分复杂,研究表明,细胞核体积、染色体体积、DNA含量和内生保护剂之间的差异是植物品种间辐射敏感性差异的内在成因^[7]。细胞DNA损伤修复能力和生物大分子化学基团的差异是同一植物不同基因型间辐射敏感性差异的主

要原因,同种生物的不同个体、器官、组织和细胞辐射敏感性都不同^[23-24]。同一植物体对 γ 辐射的反应也因机体遗传组成、辐照部位和辐照剂量的不同而不同^[4,25],这些都可能导导致品种间辐射敏感性的差异。

3.2 小麦品种间辐射敏感性的差异可能与 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因表达的差异有关

王庆^[6]以0 Gy、150 Gy和250 Gy剂量处理的京411为材料,显示*TaKu70*基因相对表达量250 Gy、150 Gy分别为0 Gy的4.5倍和4.0倍;*TaKu80*基因相对表达量分别为0 Gy的2.5倍和3.5倍。崔孟等^[21]以0 Gy、150 Gy和250 Gy剂量处理的邯6172为材料,显示其*TaKu70*基因的相对表达量与对照相差不大,仅250 Gy时表达量略微下调,*TaKu80*基因的表达具有明显诱导作用。本研究中心京411和邯6172品种*TaKu70*和*TaKu80*基因随剂量的变化趋势与文献显示结论具有一致性,只是处理组与对照组之间*TaKu70*和*TaKu80*基因的相对表达量存在差异,这可能与试验的取样时间和材料的辐照批次不同有关。 γ 射线能够在从分子到个体的多重水平下对机体造成损伤,例如:DNA、染色体、细胞、蛋白、生长和生殖等各个水平的损伤^[26]。在这些所有水平的损伤之中,DSBs是最常见的也是最严重的辐射损伤之一,能对机体产生严重的影响^[27-28]。在DSBs修复途径中,Ku70和Ku80蛋白形成异源二聚体Ku蛋白并发挥关键作用^[12-13]。二

聚体中任一蛋白亚基的突变或者损坏,都会导致修复过程的中断或者减弱^[14,17],进而导致植物体辐射敏感性的变化。本研究中小麦基因型中 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因表达差异可能与辐射敏感性差异有关。

参考文献

- [1] 余泽高,张宗华.伽马射线不同剂量对小麦鄂恩4号的辐射效应[J].湖北农业科学,2004(1):31-32
- [2] 刘录祥,郭会君,赵林妹,等.植物诱变突变技术研究现状与展望[J].核农学报,2009,23(6):1001-1007
- [3] 李鸿岩,谢漪,张昕,等.肿瘤细胞辐射敏感性相关蛋白研究进展[J].原子核物理评论,2012,29(3):300-303
- [4] Baldik R, Aytekin H, Erer M, et al. Radioactivity measurements and radiation dose assessments due to natural radiation in Karabuk[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2011, 289:297-302
- [5] 王琳清.辐射诱变改良作物的综合技术及应用[J].科技导报,1992,11(12):24-26
- [6] 王庆.小麦 DNA 损伤修复基因 *TaXRCC4*、*TaKu70* 和 *TaKu80* 的克隆及分析[D].青岛:青岛农业大学,2010
- [7] Soriano J D. The response of several rice varieties to fast neutrons[J]. Radiat Bot, 1971, 11:341-346
- [8] Inoue M, Ito R, Tabata T, et al. Varietal difference in the repair of gamma radiation induced lesions in barley[J]. Environ Expt Bot, 1980, 20:161-168
- [9] 冯志杰.普通小麦辐射敏感性的多样性模糊聚类分析[J].华北农学报,1996,11(4):12-18
- [10] Roti J L R, Vander R P, Laszlo A, et al. Thermal modulation of radiation-induced DNA damage responses[M]. New York: Molecular Determinants of Radiation Response, 2011:227-249
- [11] Singh B, Ahuja S, Singhal R K, et al. Effect of gamma radiation on wheat plant growth due to impact on gas exchange characteristics and mineral nutrient uptake and utilization[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2013, 298(1):249-257
- [12] Brandi L, Katheryn M, Susan P, et al. Repair of ionizing radiation-induced DNA double-strand breaks by nonhomologous end joining[J]. Biochem J, 2009, 417:639-650
- [13] Downs J A, Jackson S P. Means to a DNA end: The many roles of Ku[J]. Mol Cell Biol, 2004, 24:367-378
- [14] Muller C, Rodrigo G, Calsou P, et al. DNA-dependent protein kinase: a major protein involved in the cellular response to ionizing radiation[J]. Bull Cancer, 1999, 86:977-983
- [15] Takahashi T, Masuda T, Koyama Y. Enhanced gene targeting frequency in *ku70* and *ku80* disruption mutants of *Aspergillus sojae* and *Aspergillus oryzae* [J]. Mol Genet Genomics, 2006, 275:460-470
- [16] Monika K, Fatima K, Thilo S. Quantitative analysis of *Ku70* and *Ku80* mRNA gene expression in melanoma brain metastases, correlation with immunohistochemistry and in situ hybridization[J]. Cancer Genom Proteom, 2004, 1:225-230
- [17] Walker J R, Corpina R A, Goldberg J. Structure of the Ku heterodimer bound to DNA and its implications for double-strand break repair[J]. Nature, 2001, 41(2):60-61
- [18] Bundock P, AttiKum H V, HooyKaas P, et al. Increased telomere length and hypersensitivity to DNA damaging agents in an *Arabidopsis Ku70* mutant[J]. Nucleic Acids Res, 2002, 30(15):3395-3400
- [19] 朱彩霞,古佳玉,刘录祥,等.小麦 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因的克隆和分析[J].核农学报,2009,23(6):917-922
- [20] Gu J Y, Wang Q, Cui M et al. Cloning and characterization of *Ku70* and *Ku80* homologues involved in DNA repair process in wheat [J]. Plant Genet, 2014, 12(S1):99-103
- [21] 崔孟,古佳玉,郭会君,等.小麦⁶⁰Co γ 射线辐照后 *TaKu70* 和 *TaKu80* 基因应答模式及基因组多态性分析[J].核农学报,2013,27(1):17-21
- [22] 徐锡虎,徐建龙.不同类型水稻品种(系)的辐射敏感性研究[J].浙江农业科学,2000(6):61-64
- [23] Singh B, Ahuja S, Singhal R K, et al. Radiosensitivity studies and radiostability of ribulose-1,5 Bis-Carboxylase and gas exchange characteristics in wheat, Garden Pea, Field Pea, Spinach, and Okra [J]. Water Air Soil Pollut, 2014, 225(1815):2-8
- [24] Hammond E M, Olcina M, Giaccia A J. Hypoxia and modulation of cellular radiation response[M]. New York: Molecular Determinants of Radiation Response, 2011:127-141
- [25] Won E J, Lee J S. Gamma radiation induces growth retardation, impaired egg production, and oxidative stress in the marine copepod *Paracyclops nana* [J]. Aquat Toxicol, 2014, 150:17-26
- [26] Aquino KAd. Sterilization by gamma irradiation [M]. Croatia: Intech Press, 2012:172-179
- [27] Rhee J S, Kim B M, Kang C M, et al. Gamma irradiation-induced oxidative stress and developmental impairment in the hermaphroditic fish *Kryptolebias marmoratus* embryo [J]. Environ Toxicol Chem, 2012, 31:1745-1753
- [28] Rhee J S, Kim B M, Kim R O, et al. Co-expression of antioxidant enzymes with expression of p53, DNA repair, and heat shock protein genes in the gamma ray-irradiated hermaphroditic fish *Kryptolebias marmoratus* [J]. Aquat Toxicol, 2013, 140:58-67

欢迎订阅 2015 年《中国油料作物学报》

《中国油料作物学报》是由中国农业科学院油料作物研究所主办,科学出版社出版,全国唯一的一种有关油料作物专业学术期刊。主要刊登油菜、大豆、花生、芝麻、向日葵、胡麻及其他特种油料作物有关品种资源、遗传育种、栽培生理、土壤植保、综合加工利用以及品质测试技术等方面的首创新性研究论文、综述专论等。

《中国油料作物学报》2008年、2011年连续两届被列入中国精品科技期刊,多次被评为湖北省优秀期刊和湖北省优秀精品期刊,载文被国内外26家重要数据库收录。2013年版《中国科技期刊引证报告(核心版)》公布的影响因子为1.037,2013年中国科学引文数据库(CSCD)公布的影响因子为0.8899。

双月刊,定价25元/期,邮局订阅,邮发代号38-13。国外发行:中国国际图书贸易有限公司,国外代号BM6551,定价20美元/期。也可直接向本刊编辑部订阅。

地址:(430062)武昌徐东二路2号

电话:027-86813823

网址: <http://www.jouoilcrops.cn>

E-mail: yxb@oilcrops.cn