

X 射线辐照处理对甘草三萜类及黄酮类有效成分含量的影响

胡婷¹, 高智强¹, 马永生¹, 周姗¹, 尹彦超¹, 张晓冬¹, 李文东^{2*}, 刘颖^{1*}

(1. 北京中医药大学 生命科学学院, 北京 100102;

2. 北京市药品检验所 北京市保健食品化妆品检验中心, 北京 102206)

[摘要] **目的:**探讨 X 射线辐照处理对乌拉尔甘草中三萜类及黄酮类有效成分含量的影响,提高栽培甘草的突变率,为甘草的分子育种奠定基础。**方法:**分别采用不同辐射剂量的 X 射线对甘草种子进行辐照处理,栽培 1 年后采收。采用 HPLC 测定甘草样品中 2 种三萜类成分(甘草酸、异甘草酸)及 4 种黄酮类成分(甘草苷、异甘草苷、甘草素及异甘草素)的含量,计算各成分产量,应用非参数检验进行统计学分析。**结果:**X 射线辐照样品中三萜类和黄酮类有效成分的含量及产量均高于空白组。各有效成分产量随辐射剂量增加而呈先上升后下降再上升趋势。当辐射剂量为 5 Gy 时,各化合物的产量与空白组相比显著提高;当辐射剂量增加至 10 Gy 时,各化合物产量有所下降;当辐射剂量增加至 20 Gy 时,化合物产量再次明显提高,并在辐射剂量为 50 Gy 时达到最大值。**结论:**X 射线辐照处理能增加甘草生物量及其有效物质的含量和产量,其机制可能是 X 射线引起甘草基因突变,从而引起代谢物的变化。

[关键词] 甘草; X 射线; 甘草苷; 异甘草苷; 甘草素; 异甘草素; 甘草酸; 异甘草酸

[中图分类号] R282;O348.6;R284.1;R931 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2017)17-0017-05

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.2017170017

[网络出版地址] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20170612.0957.014.html>

[网络出版时间] 2017-06-12 9:57

Effect of X-ray Irradiation Treatment on Contents of Triterpenoids and Flavonoids in *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma*

HU Ting¹, GAO Zhi-qiang¹, MA Yong-sheng¹, ZHOU Shan¹, YIN Yan-chao¹,

ZHANG Xiao-dong¹, LI Wen-dong^{2*}, LIU Ying^{1*}

(1. School of Life Science, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100102, China;

2. Beijing Center for Health Food and Cosmetics Control, Beijing Institute for Drug Control, Beijing 102206, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate effect of X-ray irradiation on the contents of triterpenoids and flavonoids in *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma* for increasing the mutation rate of cultivated product of this herb, and lay a foundation for molecular breeding of *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma*. **Method:** Different radiation doses of X-ray were used to irradiate the seeds of *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma*, which were cultivated for one year. The contents of two triterpenoids and four flavonoids were assayed by HPLC. And nonparametric test were used to analyze the contents and yields of these six components. **Result:** The contents and yields of these six components in radiation samples were higher than that in blank group. The yields of triterpenoids and flavonoids showed an increasing-decreasing-increasing pattern with the increase of radiation dose. Compared with the blank group, the yields of six components in radiation group increased dramatically at the radiation dose of 5 Gy, and declined

[收稿日期] 20170313(010)

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81503181)

[第一作者] 胡婷,在读硕士,从事药用植物功能基因与分子生药学研究,Tel:15201202911,E-mail:ht20140901@163.com

[通讯作者] *刘颖,博士,副教授,从事药用植物功能基因与分子生药学研究,Tel:86-10-84738646,E-mail:liuyliwd@sina.com;

*李文东,副主任药师,从事药物分析相关研究,Tel:010-52779627,E-mail:sxlwd76@163.com

slightly at the radiation dose of 10 Gy, then increased again at the radiation dose of 20 Gy, and reached the peak at the radiation dose of 50 Gy. **Conclusion:** X-ray irradiation treatment can increase the biomass of Glycyrrhizae Radix et Rhizoma and improve the contents and yields of six active components, its mechanism may be associated with gene mutation, which changes the accumulation of metabolites.

[**Key words**] Glycyrrhizae Radix et Rhizoma; X-ray; liquiritin; isoliquiritin; liquiritigenin; isoliquiritigenin; 18 β -glycyrrhizic acid; 18 α -glycyrrhizic acid

甘草是我国最常用的大宗药材之一,始载于《神农本草经》,在中国有着两千多年的药用历史,具有补脾益气、清热解毒、祛痰止咳、缓急止痛、调和诸药等作用,素有“国老”、“十方九草”之美誉^[1]。现代药理学研究显示,甘草在抗癌^[2]、抗炎^[3]、抗病毒^[4]、抗氧化^[5]、抗糖尿病^[6]、保肝^[7]、免疫调节^[8]、神经系统保护^[9]等方面均发挥着重要作用。此外,甘草还可用作食品添加剂、烟草矫味剂等工业原料^[10]。因此,国内外对甘草的需求逐年增加,自 1980 年代以来我国甘草的年需求量一直在 3.75 万吨以上^[11]。

2015 年版《中国药典》规定甘草的指标性成分为三萜类化合物甘草酸及黄酮类化合物甘草苷,且栽培甘草的合格标准为甘草酸的质量分数不低于 2.0%,甘草苷的质量分数不低于 0.5%。然而,本课题组前期对四大药材市场中甘草药材的调查研究显示,市售栽培甘草中甘草酸、甘草苷的达标率分别为 52.5% 和 87.5%^[12]。此外,有文献报道对全国 9 省区 37 个旗县 165 份野生甘草和 1 013 份栽培甘草的甘草酸含量进行调查^[13],结果显示栽培甘草中甘草酸平均质量分数(1.51 \pm 0.49)%,低于 2015 年版《中国药典》的最低标准。栽培甘草的质量普遍偏低,将严重影响甘草饮片的临床疗效及中成药(含甘草)的质量。因此,提高栽培甘草的质量已成为制约甘草资源可持续发展的关键问题。

近些年来,较为常见的育种方法包括选择育种、杂交育种、诱变育种等。其中,辐射诱变技术具有突变率高、突变谱宽、后代性状稳定快、育种周期短等优点,已成为获得新种质资源的有效途径之一。辐射诱变的作用机制主要是染色体畸变和突变。染色体畸变是辐射损伤的表现特征,在高能量和强穿透力的射线辐照下,可诱发染色体数量、结构和行为畸变,从而出现单倍体及非整倍体类型等。在分子水平上,辐射可以使 DNA 发生断裂、损伤、重排和碱基缺失、重复、替换等生物学效应。此外,射线促使细胞染色体发生改变的同时,还会引起生物体与细胞质有关的遗传性核外变异^[14]。目前,辐射诱变技术

主要用于农作物和花卉育种^[15]。近年来该技术也逐渐用于药用植物,对提高其有效成分含量具有显著影响^[16]。据文献报道,应用⁶⁰Co- γ 射线辐射甘草风干种子,对甘草植株当代生长和产量有较大影响,其鲜重、长度、主根粗度均明显提高^[17]。但是 γ 射线与其他诱变因素相比,其对植物的辐射损伤较大,生物学效应的有益突变效率相对较低^[16],因此,本课题组拟采用 X 射线对乌拉尔甘草种子进行辐照处理,以期获得优良的甘草种质资源。

大量药理学研究显示,甘草中除了作为检测指标的甘草酸及甘草苷外,尚有大量其他活性成分,如异甘草酸,其具有亲脂性好、抗炎活性强、肝脏靶向性高、不良反应少等诸多优点,已成为第四代甘草酸制剂而被广泛使用^[18]。黄酮类化合物异甘草苷、甘草素、异甘草素也在抗氧化、抗抑郁方面具有显著疗效^[19-20]。因此,本实验除了考察 2015 年版《中国药典》规定的指标性成分外,还对甘草中其他 4 种化合物的含量进行了调查,以期更全面地反映 X 射线辐照处理对栽培甘草质量的影响。

本实验采集了来自新疆和田的健康饱满的甘草种子,按 0 ~ 50 Gy 的 X 射线辐射剂量对其进行梯度处理,栽培 1 年后测定各样品中 4 种黄酮类化合物(甘草苷、异甘草苷、甘草素与异甘草素)和 2 种三萜类化合物(甘草酸与异甘草酸)的含量,并对其产量进行分析,探究辐照处理对甘草中黄酮类及三萜类活性成分含量及产量的影响规律,对于提高栽培甘草的质量具有重要意义,并且为该药材的定向分子育种奠定基础。

1 材料

HEXTRON-200 型电子直线加速器(清华同方威视股份有限公司),1100 系列高效液相色谱仪(美国安捷伦公司),BT224S 型 1/10 万电子天平(德国赛多利斯公司)。从新疆和田(E79°55'19.96",N37°07'0.85")采集的健康饱满的甘草种子,经北京中医药大学刘春生教授进行形态学鉴定,均符合 2015 年版《中国药典》的相关规定;甘草苷、异甘草苷、甘草酸单铵盐、甘草素对照品(成都曼思特生物

科技有限公司,批号分别为 MUST-16032801, MUST-15031204, MUST-16011310, MUST-15021104, 纯度依次为 98.5%, 99.99%, 98.86%, 99.07%), 异甘草素对照品(成都普菲德生物技术有限公司,批号 16061501, 纯度 98%), 异甘草酸镁对照品(中国食品药品检定研究院,批号 100879-201302, 纯度 90.8%), 水为屈臣氏蒸馏水, 乙腈、甲醇为色谱纯, 其他试剂均为分析纯。

2 方法与结果

2.1 辐照处理

采用表 1 中设置的辐射剂量, 0 组为空白组, 1~4 组分别为辐射剂量 5~50 Gy 梯度增加的处理组, 对各组 100 粒甘草种子进行辐照处理。将辐射处理后的种子, 用浓硫酸浸泡 30 min, 用水洗净后于 4 月播种, 并于秋季 10 月底采收。采用本课题组前期建立的甘草分子鉴定法^[12], 确定所用植物材料均为豆科植物甘草 *Glycyrrhiza uralensis*。

表 1 不同组别甘草的 X 射线辐射处理

Table 1 X-ray irradiation treatment of *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma* in different groups

组别	辐射剂量/Gy	时间/s	辐射强度/Gy·min ⁻¹
0	0	0	0
1	5	10	28.47
2	10	20	28.56
3	20	40	28.29
4	50	100	28.29

2.2 甘草中 2 种三萜类化合物的含量测定^[21]

2.2.1 对照品溶液及标准曲线的制备

精密称取甘草酸单铵盐和异甘草酸镁对照品适量, 用 50% 甲醇溶解, 制成每 1 mL 含甘草酸铵 0.225 2 mg 和异甘草酸镁 0.029 733 mg 的混合对照品溶液, 分别进样 2, 5, 10, 15, 20 μL, 以峰面积为纵坐标, 进样量为横坐标, 得异甘草酸、甘草酸的标准曲线分别为 $Y = 1 \times 10^{-6} X + 5.557 \times 10^{-3}$ ($R^2 = 0.999 9$), $Y = 1 \times 10^{-6} X + 9.814 \times 10^{-3}$ ($R^2 = 0.999 9$), 线性范围依次为 0.441 2~4.412 6, 0.019 2~0.192 μg。

2.2.2 供试品溶液的制备

同文献[21]的方法制备。

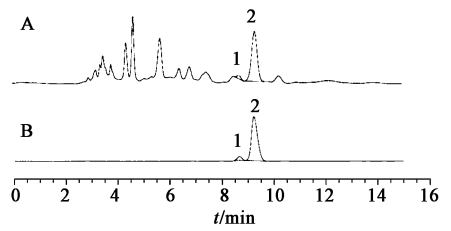
2.2.3 色谱条件

Agela Durashell C₁₈-AM 色谱柱 (4.6 mm × 250 mm, 5 μm), 流动相 10 mmol·L⁻¹ 高氯酸铵水溶液(用氨水调节 pH 8.2)-甲醇(48:52), 流速 0.8 mL·min⁻¹, 检测波长 250 nm, 柱温 50 °C, 进样量 10 μL。见图 1。

2.3 甘草中 4 种黄酮类化合物的含量测定^[22]

2.3.1 对照品溶液及标准曲线的制备

分别精密称取甘草素、异甘草素、甘草苷和异甘草苷对照品



A. 供试品; B. 混合对照品; 1. 异甘草酸; 2. 甘草酸

图 1 辐射甘草样品中 2 种三萜类成分的 HPLC

Fig. 1 HPLC chromatograms of two triterpenoids in *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma* samples after irradiation

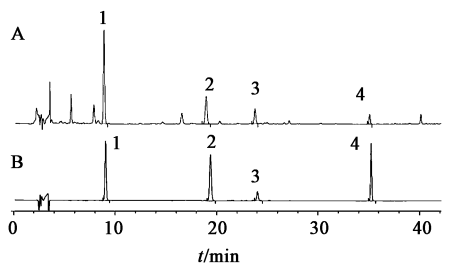
5.87, 2.94, 5.72, 2.60 mg, 用 50% 甲醇经两步稀释获得混合对照品溶液, 4 种成分的质量浓度分别为 1.174, 2.352, 11.44, 5.20 mg·L⁻¹。取该混合对照品溶液, 分别进样 1, 2, 5, 10, 15, 20 μL, 以峰面积为横坐标, 进样量为纵坐标, 得四者的标准曲线分别为 $Y = 3.180 \times 10^{-4} X - 3.222 \times 10^{-5}$ ($R^2 = 0.999 9$), $Y = 1.424 \times 10^{-4} X - 6.781 \times 10^{-5}$ ($R^2 = 0.999 9$), $Y = 5.645 \times 10^{-4} X + 2.205 \times 10^{-4}$ ($R^2 = 0.999 9$), $Y = 2.480 \times 10^{-4} X + 2.214 \times 10^{-4}$ ($R^2 = 0.999 9$), 线性范围依次为 0.001 2~0.023 4, 0.002 4~0.047 0, 0.011 4~0.228 8, 0.005 2~0.104 0 μg。

2.3.2 供试品溶液的制备

同文献[22]中的方法制备。

2.3.3 色谱条件

CAPCELL PAK C₁₈ MG II 色谱柱 (4.6 mm × 250 mm, 5 μm), 流动相乙腈(A)和 0.1% 磷酸水溶液(B)梯度洗脱(0~15 min, 20%~25% A; 15~30 min, 25%~40% A; 30~40 min, 40%~65% A; 40~41 min, 65%~95% A; 41~50 min, 95% A; 50~51 min, 95%~20% A; 51~55 min, 20% A); 检测波长分别为 276 nm(0~13 min), 360 nm(13~21 min), 276 nm(21~28 min), 376 nm(28~55 min); 流速 1.0 mL·min⁻¹, 柱温 30 °C, 进样量 20 μL。见图 2。



A. 供试品; B. 混合对照品; 1. 甘草苷; 2. 异甘草苷; 3. 甘草素; 4. 异甘草素

图 2 辐射甘草样品中 4 种黄酮类成分的 HPLC

Fig. 2 HPLC chromatograms of four flavonoids in *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma* samples after irradiation

2.4 X 射线辐照处理对甘草中三萜类及黄酮类成分含量的影响 共采收了 74 株甘草样品, 0~4 组分别为 8, 26, 12, 16, 12 株。按外标法分别计算甘草样品中甘草苷、异甘草苷、甘草素、异甘草素、甘草酸和异甘草酸的含量, 运用 SAS 8.0 软件对 6 种化合物在各辐射剂量组与空白组的含量进行差异性分析, 见表 2。结果发现各辐射组的三萜类成分含量均显著高于空白组。1, 3, 4 组的甘草苷和异甘草苷含量显著高于空白组; 1, 3 组的甘草素含量显著高于空白组; 辐射组的异甘草素含量均显著高于空白组。

表 2 甘草样品中三萜类及黄酮类成分的质量分数 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Contents of triterpenoids and flavonoids in Glycyrrhizae Radix et Rhizoma ($\bar{x} \pm s$)

mg·g⁻¹

组号	剂量/Gy	n	甘草酸	异甘草酸	甘草苷	异甘草苷	甘草素	异甘草素
空白	0	8	4.602 ± 2.175	0.268 ± 0.140	4.870 ± 0.640	0.579 ± 0.126	0.444 ± 0.051	0.052 ± 0.004
1	5	26	11.450 ± 1.595 ³⁾	0.540 ± 0.131 ²⁾	9.635 ± 4.138 ¹⁾	1.258 ± 0.506 ¹⁾	0.769 ± 0.322 ¹⁾	0.129 ± 0.060 ²⁾
2	10	12	11.011 ± 4.925 ¹⁾	0.517 ± 0.128 ²⁾	4.892 ± 1.592	0.660 ± 0.236	0.614 ± 0.436	0.111 ± 0.070 ¹⁾
3	20	16	10.471 ± 3.234 ¹⁾	0.487 ± 0.166 ²⁾	8.955 ± 2.409 ¹⁾	1.378 ± 0.274 ²⁾	0.834 ± 0.324 ¹⁾	0.160 ± 0.060 ²⁾
4	50	12	8.569 ± 4.589 ¹⁾	0.582 ± 0.134 ¹⁾	11.150 ± 1.314 ³⁾	1.582 ± 0.215 ³⁾	0.566 ± 0.098	0.104 ± 0.023 ¹⁾

注: 与空白组比较¹⁾ P < 0.05, ²⁾ P < 0.01, ³⁾ P < 0.001 (表 3 同)。

表 3 甘草样品的鲜重、干重及其三萜类、黄酮类成分的产量 ($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Fresh weight, dry weight of Glycyrrhizae Radix et Rhizoma and yields of its triterpenoids and flavonoids ($\bar{x} \pm s$)

组号	剂量/Gy	n	鲜重/g	干重/g	甘草酸/mg	异甘草酸/mg
空白	0	8	1.32 ± 0.210	0.43 ± 0.100	1.783 ± 0.422	0.125 ± 0.066
1	5	26	5.83 ± 2.330 ³⁾	2.48 ± 1.240 ³⁾	32.448 ± 8.798 ³⁾	1.599 ± 0.748 ³⁾
2	10	12	6.58 ± 2.170 ²⁾	2.72 ± 1.050 ²⁾	32.170 ± 21.313 ¹⁾	1.501 ± 0.783 ²⁾
3	20	16	10.17 ± 7.320 ¹⁾	4.73 ± 3.480 ²⁾	48.490 ± 36.622 ¹⁾	2.054 ± 1.172 ¹⁾
4	50	12	20.00 ± 16.240 ¹⁾	9.64 ± 7.557 ²⁾	83.863 ± 37.874 ¹⁾	6.891 ± 3.986 ¹⁾

组号	剂量/Gy	n	甘草苷/mg	异甘草苷/mg	甘草素/mg	异甘草素/mg
空白	0	8	2.137 ± 0.783	0.241 ± 0.019	0.194 ± 0.068	0.023 ± 0.004
1	5	26	25.020 ± 3.886 ³⁾	3.467 ± 0.515 ³⁾	1.654 ± 0.644 ²⁾	0.296 ± 0.096 ²⁾
2	10	12	15.178 ± 7.668 ¹⁾	1.918 ± 0.761 ¹⁾	1.601 ± 0.742 ¹⁾	0.275 ± 0.110 ¹⁾
3	20	16	37.308 ± 22.390 ¹⁾	6.205 ± 4.350 ¹⁾	3.762 ± 2.766 ¹⁾	0.776 ± 0.646 ¹⁾
4	50	12	129.036 ± 89.756 ¹⁾	19.122 ± 15.310 ¹⁾	5.392 ± 4.394 ¹⁾	1.082 ± 1.045

3 讨论

本文研究发现辐射甘草的鲜重和干重均显著高于空白组, 且随辐射剂量增大而增大; 不同辐射剂量对有效成分含量和产量均有一定程度的影响。基于以上研究结果, 笔者认为辐照处理能有效增加甘草样品的生物量, 并提高有效成分的含量和产量。对于辐射条件的优化, 可以从样品材料类型、辐射剂量方面进行优化。不同物种、不同材料所需的辐射剂量不同。目前广泛用植物器官或组织作为辐射诱变材料, 遗传突变的性状可以直接保存下来, 不会因植物有性繁殖中减数分裂染色体不配对而被消除掉, 并且幼嫩的植物组织突变效率更高。但并非辐射剂量越高则甘草有效成分的含量及产量越高。首先 X

2.5 X 射线辐照处理后甘草中三萜类及黄酮类成分的产量分析 根据 74 株甘草样品中甘草苷、异甘草苷、甘草素、异甘草素、甘草酸和异甘草酸的含量及其干重, 计算各成分的产量 (产量 = 成分的质量分数 × 干重), 运用 SAS 8.0 软件对辐射组与空白组各化合物产量进行差异性分析, 见表 3。结果发现辐射组甘草的干重和鲜重均随辐射剂量增大而增大, 且均显著高于空白组。各辐射组中甘草苷、异甘草苷、甘草素、异甘草素、甘草酸和异甘草酸的产量均明显高于空白组。

射线辐射时, 原子中的电子在不同电子层间跃迁, 会有热效应。辐射剂量过高和辐射时间过长会产生大量热量, 会直接破坏甘草种子的生物学活性, 进行影响甘草种子存活及发芽, 甚至出现严重损伤、畸变、死苗或不育植株。其次, 从本文研究结果可知, 甘草中所考察的有效成分产量随辐射剂量增加而呈现出先上升后下降再上升的趋势, 其原因可能与植物体内的损伤修复机制以及药用植物合成代谢规律有关。本研究结果并未直接体现出辐射剂量越大, 有益突变效果越好。此外, 培育高质量的甘草, 除了考虑其有效成分的含量和产量外, 还需考虑种子发芽率、经济成本、突变稳定性等。因此, 并非辐射剂量越高则越好, 而应针对不同辐射材料, 采用最适的

辐射剂量。

甘草在医药及食品领域发挥着重要作用,提高栽培甘草的质量、产量及其优良种质资源具有重要意义。辐射诱变能引发植物DNA变异,通过化学成分生物量确定高产植株,再基于突变体的基因定位、基因克隆、基因功能研究,可以探讨其高产的分子机制,缩短育种年限,培育优良种质资源。如今,辐射诱变在甘草方面的研究包括:① γ 射线辐照处理甘草种子,并对其当代生长效应(发芽率、生长速度、主根粗度、长度、鲜重)变化进行研究^[17];②卫星搭载甘草遗传变异的ISSR(inter-simple sequence repeat,简单重复序列区间)分析,发现太空环境对甘草基因组有一定的诱变作用^[23],并影响其次生代谢产物的合成^[24]。由于 γ 射线对植物的辐射损伤较大^[16],因此本文采用X射线辐射处理甘草种子,通过检测甘草中的有效成分含量和产量来确定高产植株,为将来进一步分析高产植株次生代谢途径上相关功能基因的多态性,探索其高产的分子机制奠定基础。此外,结合辐射诱变优势,运用现代生物技术,能缩短育种年限,创造生长周期短、有效成分高的药用植物种质资源并指导甘草的定向分子育种工作。

[参考文献]

[1] 曾路,李胜华,楼之岑. 国产甘草的生药形态组织学研究[J]. 药学学报,1988,2(3):200-208.

[2] 李玉婷,闫晨,郭晓东,等. 甘草对芫花抗小鼠肝癌腹水作用的影响[J]. 中国实验方剂学杂志,2017,23(5):107-112.

[3] FU Y, CHEN J, LI Y J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of six flavonoids separated from licorice[J]. Food Chem,2013,141(2):1063-1071.

[4] HUANG W, CHEN X, LI Q, et al. Inhibition of intercellular adhesion in herpes simplex virus infection by glycyrrhizin [J]. Cell Biochem Biophys, 2012, 62(1):137-140.

[5] HUANG X, QIN J, LU S. Magnesium isoglycyrrhizinate protects hepatic L02 cells from ischemia/reperfusion induced injury[J]. Int J Clin Exp Pathol,2014,7(8):4755-4764.

[6] Gaur R, Yadav K S, Verma R K, et al. *In vivo* anti-diabetic activity of derivatives of isoliquiritigenin and liquiritigenin [J]. Phytomedicine, 2014, 21(4):415-422.

[7] Seo J Y, HAN J H, Kin Y J, et al. Protective effects of dehydroglyasperin c against carbon tetrachloride-induced liver damage in mice[J]. Food Sci Biotechnol,2014,23(2):547-553.

[8] Kim M E, Kim H K, Kim D H, et al. 18 β -Glycyrrhetic

acid from licorice root impairs dendritic cells maturation and Th1 immune responses [J]. Immunopharmacol Immunotoxicol,2013,35(3):329-335.

[9] Chakravarthi K K, Avadhani R. Enhancement of hippocampal CA3 neuronal dendritic arborization by *Glycyrrhiza glabra* root extract treatment in Wister albino rats[J]. J Nat Sci Biol Med,2014,5(1):25-29.

[10] 豆康宁,王飞,罗海澜,等. 甘草及提取物在食品中的应用进展[J]. 食品研究与开发,2014,35(21):140-142.

[11] 刘洋洋,刘春生,曾斌芳,等. 甘草种质资源研究进展[J]. 中草药,2013,44(24):3593-3598.

[12] 杨瑞,李文东,马永生,等. 不同基原甘草的分子鉴定及市售甘草药材的质量评价[J]. 药学学报,2017,52(2):318-326.

[13] 魏胜利,王文全,王继永,等. 我国不同产区野生与栽培甘草的甘草酸含量及其影响因子的初步研究[J]. 中国中药杂志,2012,37(10):1341-1345.

[14] 杨兆民,张璐. 辐射诱变技术在农业育种中的应用与探析[J]. 基因组学与应用生物学,2011,30(1):87-91.

[15] 王桂霞,张涛涛,董静,等. 中国草莓育种的回顾和展望[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(2):272-276.

[16] 贾彩凤,李艾莲. 我国药用植物辐射诱变育种的研究进展[J]. 中草药,2007,38(4):633-637.

[17] 叶力勤,刘志. γ 射线辐照甘草种子当代生长效应的研究[J]. 宁夏农林科技,1996(6):28-31.

[18] 宋佳伟,邢蓉. 异甘草酸镁的药理与临床[J]. 中国新药与临床杂志,2012,31(10):578-582.

[19] Vaya J, Belinky P A, Aviram M. Antioxidant constituents from licorice roots: isolation, structure elucidation and antioxidative capacity toward LDL oxidation [J]. Free Radic Biol Med,1997,23(2):302-313.

[20] ZHAO Z, WANG W, GUO H, et al. Antidepressant-like effect of liquiritin from *Glycyrrhiza uralensis* in chronic variable stress induced depression model rats[J]. Behav Brain Res,2008,194(1):108-113.

[21] 杨瑞,李文东,袁伯川,等. 3种不同基原甘草中18 α -甘草酸与18 β -甘草酸的含量分析[J]. 药物分析杂志,2016,36(6):1065-1071.

[22] 杨瑞,袁伯川,马永生,等. 3种不同基原甘草中4个主要黄酮类化合物的含量分析[J]. 药物分析杂志,2016,36(10):1729-1736.

[23] 严硕,高文远,路福平,等. 卫星搭载甘草遗传变异的ISSR分析[J]. 中国药学杂志,2009,44(18):1377-1380.

[24] 高文远,李克峰,高秀梅,等. 太空环境对甘草DNA诱变作用和次生代谢产物的影响[J]. 中国科学:生命科学,2008,38(11):1090-1094.

[责任编辑 刘德文]