

# 甘肃产黄芪重金属含量特征分析及健康风险评估

## Analysis of heavy metal content and health risk assessment of *Astragalus membranaceus* in Gansu province

张思维<sup>1</sup> 李东梅<sup>1</sup> 刘小云<sup>2</sup>

ZHANG Si-wei<sup>1</sup> LI Dong-mei<sup>1</sup> LIU Xiao-yun<sup>2</sup>

薛利新<sup>2</sup> 孙建云<sup>1,2</sup> 李拥军<sup>1,2</sup>

XUE Li-xin<sup>2</sup> SUN Jian-yun<sup>1,2</sup> LI Yong-jun<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃中医药大学公共卫生学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省疾病预防控制中心, 甘肃 兰州 730020)

(1. School of Public Health, Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Gansu Center for Disease Control and Prevention, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**摘要:**目的:了解甘肃主产区黄芪中重金属污染情况,并对食用黄芪中潜在的健康风险进行评估。方法:采用随机抽样的方法,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)法测定黄芪中 Pb、Cd、As、Hg、Cu 5 种重金属元素含量,并结合每日最大可耐受摄入量(EDI)、靶标危害系数(THQ)和终身致癌性风险(LCR)进行健康风险评估。结果:58 批次黄芪样品中 Pb、Cd、As、Hg、Cu 元素的平均含量分别为 0.148, 0.024, 0.139, 0.011, 4.569 mg/kg, 但均未超标。健康风险评估模型 EDI<PTDI; THQ 值从高到低为 As>Cu>Pb>Hg>Cd, 且均<1; LCR 值< $1 \times 10^{-6}$ , 表明黄芪样本总体水平是安全的。结论:甘肃主产地黄芪中 5 种重金属含量对成人和儿童健康不存在潜在风险。

**关键词:**黄芪; 重金属残留; 特征分析; 健康风险评估

**Abstract:** Objective: This study aimed to investigate the pollution of heavy metals in *Astragalus membranaceus* in the main producing areas of Gansu, and to evaluate the potential health risks of edible *Astragalus membranaceus*. Methods: The contents of five heavy metal elements Pb, Cd, As, Hg and Cu in *Astragalus membranaceus* were determined by inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) by random sampling method, and the data were analyzed. Estimated Daily

Intake (EDI), Target Hazard Factor (THQ) and Lifetime Carcinogenicity Risk (LCR) were used for health risk assessment. Results: The average contents of Pb, Cd, As, Hg, and Cu elements in 58 batches of *Astragalus membranaceus* samples were 0.148, 0.024, 0.139, 0.011 and 4.569 mg/kg, respectively. According to the limited standards stipulated in the 2020 edition of the Chinese Pharmacopoeia, although the detection rate of individual elements was high, but none of them exceeds the standard. The health risk assessment model showed that EDI<PTDI, the order of THQ was As>Cu>Pb>Hg>Cd, and all less than 1, LCR was also less than  $1 \times 10^{-6}$ . Indicated that the overall level of *Astragalus membranaceus* samples in this study was safe. Conclusion: The content of five heavy metals in *Astragalus membranaceus* produced in Gansu will not cause potential risks to the health of adults and children, and there is no potential carcinogenic risk.

**Keywords:** *Astragalus membranaceus*; heavy metal residues; feature analysis; health risk assessment

黄芪(*Astragalus membranaceus*)是中国传统的大宗中药材之一,药用历史悠久<sup>[1-2]</sup>。从黄芪中分离出的黄酮、皂苷、多糖和氨基酸等物质,被认为是黄芪含有的主要活性成分<sup>[3-5]</sup>。2019 年国家发布“关于对党参等 9 种物质开展按照传统既是食品又是中药材的物质管理试点工作的通知”(国卫食品函[2019]311 号)<sup>[6]</sup>,将黄芪列入食药物质试点,甘肃省为试点省份之一。

目前,对甘肃产区黄芪的研究多集中在其活性物质和提取成分方面<sup>[7-8]</sup>。有关黄芪中重金属元素含量检测的研究较多,但对其安全性进行评估的较少,且安全风险评估选取的样本来自于全国多个省市,并未对某个主产

**基金项目:**甘肃省技术创新引导计划项目(编号:20CX4ZA022); 甘肃省中医药科研项目(编号:GZKP-2020-26, GZKP-2021-24)

**作者简介:**张思维,女,甘肃中医药大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李拥军(1980—),男,甘肃省疾病预防控制中心主任检验技师,硕士。E-mail:646343850@qq.com

**收稿日期:**2022-10-24 **改回日期:**2023-04-20

区的样品单独进行研究。根据文献[6]的要求,黄芪作为食药物质其重金属限量参考中药材的污染限量,存在法规的逻辑性衔接障碍<sup>[9]</sup>,而食品中重金属的污染限量值要有严谨的安全性评价,对其重金属限量值进行规范是亟待解决的现实问题。

为保证用药安全,全面了解甘肃地区黄芪中重金属残留的情况<sup>[10-12]</sup>,研究拟采用电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)技术对黄芪中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu) 5种重金属含量进行检测,并结合每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)、靶标危害系数法(target hazard quotients, THQ)和终身致癌性风险(lifetime cancer risk, LCR)对其进行健康风险评估,以期为甘肃食药物质黄芪的安全性评价提供依据,为制定地方标准和国家标准限量提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

#### 1.1.1 主要仪器

四级杆电感耦合等离子体质谱仪: Thermo X-Series2型,美国赛默飞世尔科技公司;

超级微波消解平台: UltraWAVE型,意大利Milestone公司;

电子天平: X-105型,梅特勒—托利多(中国)有限公司。

#### 1.1.2 试剂

铅、镉、砷、铜元素标准溶液: 1 000.0 μg/mL,美国Thermo公司;

汞元素标准溶液: 100.0 μg/mL,美国Thermo公司;

锆、铟、铋内标溶液: 100.0 μg/mL,美国Thermo公司;

调谐液 Tune A: 质量浓度(10.0±0.1) μg/L,美国Thermo公司;

超纯硝酸、半胱氨酸: 优级纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 样品采集 采用随机抽样的方法,在甘肃省的7个主要黄芪产地采样,分别为漳县4批次,陇西县5批次,渭源县14批次,榆中县5批次,永登县3批次,岷县17批次和宕昌县10批次,共计58批次黄芪样本。先用自来水冲洗干净,再用蒸馏水清洗后自然风干、粉碎过筛,4℃贮藏备用。

1.2.2 供试品溶液制备 称取0.500 0 g样品于四氟乙烯消解罐中,用少量水浸湿,加入5 mL硝酸浸泡过夜。密闭,消解,冷却定容至50 mL,同时制备试剂空白溶液。

1.2.3 标准溶液制备 准确量取铅、砷、镉、铜和汞标准

溶液适量,用2%硝酸溶液作为稀释液,1%半胱氨酸作稳定剂,采用逐级稀释方法制备标准系列。铅、砷质量浓度为0.0,1.0,5.0,10.0,20.0 μg/L;镉质量浓度为0.0,0.5,2.5,5.0,10.0 μg/L;铜质量浓度为0.0,50.0,100.0,200.0,500.0 μg/L;汞质量浓度为0.0,0.2,0.5,1.0,2.0,5.0 μg/L。

1.2.4 检测方法 采用电感耦合等离子体质谱法。方法的检出限(LOD)为:汞3.5 μg/kg、铜9 μg/kg、砷8 μg/kg、镉6 μg/kg、铅7 μg/kg。

1.2.5 金属污染物限值判定标准 按照《中国药典》2020版中规定对药材黄芪重金属含量的限值进行评价,其中铅<5 mg/kg,镉<1 mg/kg,砷<2 mg/kg,汞<0.2 mg/kg,铜<20 mg/kg。

1.2.6 质量控制 每批次样品均设定3个空白样品和20%的平行样品,5种重金属线性关系均满足检测要求,相关系数(*r*)均>0.999,各元素的平均加样回收率为90%~105%,RSD<5%。

#### 1.2.7 黄芪中重金属污染的健康风险评估

(1) EDI计算:将EDI与每日暂定可耐受摄入量PTDI进行对比,以此来评价服用黄芪可能导致的风险类型。铅、镉、砷、汞和铜的PTDI分别为0.003 57,0.000 83,0.002 14,0.000 57,0.500 00 mg/(kg·d)。EDI<PTDI时,认为摄入重金属的量对人体无明显健康影响。

$$EDI = \frac{C \times R_{ID}}{W_B} \quad (1)$$

式中:

*C*——重金属质量分数,mg/kg;

*W<sub>B</sub>*——人体平均体重(标准成人55.9 kg,儿童为32.7 kg)<sup>[13]</sup>,kg;

*R<sub>ID</sub>*——每日摄入药材量(成人摄入量取30 g,儿童取9 g)<sup>[14]</sup>,g。

(2) THQ、LCR计算:THQ<1时,认为黄芪中重金属含量未对人体健康造成明显影响;THQ>1时,认为黄芪中重金属含量对人体造成潜在影响,已危害到健康。根据USEPA规定,LCR的标准值为1×10<sup>-6</sup>,超过该限值则表明有风险存在,该风险不可接受;若LCR超过1×10<sup>-3</sup>,则认为有致癌的风险<sup>[15-16]</sup>。

$$THQ = \frac{C \times F_E \times D_E \times R_{ID}}{W_B \times T_A \times R_{FD}} \quad (2)$$

$$LCR = \frac{C \times R_{ID} \times F_E \times D_E \times C_{SF}}{W_B \times T_A} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中:

*C*——重金属质量分数,mg/kg;

*F<sub>E</sub>*——每年暴露于重金属毒物的时间<sup>[17]</sup>,30 d;

*T<sub>A</sub>*——平均接触非致癌毒物的时间(人平均寿命70年×365 d)<sup>[18]</sup>;

$D_E$ ——暴露于重金属毒物的时间,30 年;

$R_{FD}$ ——参考剂量(铜、铅、砷、镉、汞分别为 0.04, 0.001 5,0.000 3,0.001,0.000 3  $\mu\text{g}/\text{g}$ )<sup>[19]</sup>, $\mu\text{g}/\text{g}$ ;

$C_{SF}$ ——致癌斜率因子(砷为 1.5,镉为 6.1,铅为 0.008 5)<sup>[20]</sup>。

1.2.8 数据分析 采用 Excel 2019 软件进行数据归类整理,使用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。对数据进行主成分分析,以 KMO 值 $>0.5$ ,巴特利特球形度检验的显著性 $<0.05$  检验是否可以主成分分析;黄芪重金属含量的总体数据呈偏态分布,相关性分析采用 Spearman 分析方法;ANOVA 单因素分析采用 LSD 多重比较,以  $P<0.05$  为具有统计学意义;检测结果低于检出限的按 1/2 LOD 参与统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄芪中重金属含量总体检出情况

由表 1 可知,黄芪中 5 种重金属含量的平均值由高到低为铜 $>$ 铅 $>$ 砷 $>$ 镉 $>$ 汞,与孔丹丹等<sup>[20]</sup>的结果一致。铜和砷两种元素的检出率最高,均为 100%,汞元素最低,其他金属元素也有不同程度的检出。将重金属含量测定结果与《中国药典》2020 版中所规定的重金属含量限值进行对比,均未超标。综上,该批次黄芪样本虽不存在超标现象,但重金属污染较为严重,可能与其周围生长环境、土壤、大气等因素有关。因此,应从源头上减少污染,加强对中药材的监管,以保证黄芪的用药安全。

表 1 黄芪中重金属检测总体检出情况

Table 1 Overall detection of heavy metals in *Astragalus*

重金属	质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	检出率/ %	合格率/ %
铜	0.703 1~8.153 1	4.569 $\pm$ 1.811	100.0	100
镉	未检出~0.085 5	0.024 $\pm$ 0.013	98.3	100
砷	0.026 6~0.352 8	0.139 $\pm$ 0.049	100.0	100
汞	未检出~0.155 0	0.011 $\pm$ 0.028	24.1	100
铅	未检出~0.743 9	0.148 $\pm$ 0.180	93.1	100

### 2.2 重金属元素主成分分析

结果显示,KMO 值为 0.627 $>$ 0.5,巴特利特球形度检验的显著性为 0.001( $P<0.05$ ),表明数据可以进行主成分分析。由表 2 可知,以特征值 $>1$  为标准,共提取了 2 个主成分,累计方差贡献率为 60.831%。由表 3 可知,铜和镉在 PC1 上的载荷值较高,为 0.745 和 0.723,且均呈高度正相关,而在 PC2 上的载荷值较低,可以认为这两种元素是 PC1 的代表因子。同理可得,PC2 的代表因子为铅。综上,铜、镉和铅是黄芪中的主要污染元素。

### 2.3 重金属元素含量间的相关性分析

由表 4 可知,砷与镉、铜和铅的相关系数分别为 0.51,

表 2 主成分的特征值及方差贡献率

Table 2 Eigenvalues and variance contribution rate of principal components analysis

主成分	特征值	方差贡献率/%	方差累积贡献率/%
1	1.926	38.525	38.525
2	1.115	22.306	60.831
3	0.843	16.853	77.684
4	0.582	11.643	89.327
5	0.534	10.673	100.000

表 3 主成分载荷矩阵

Table 3 Principal component loading matrix

元素	PC1	PC2
汞	0.558	-0.385
铜	0.745	-0.214
砷	0.708	-0.021
铅	0.187	0.911
镉	0.723	0.301

表 4 黄芪中重金属含量的 Spearman 相关分析<sup>†</sup>

Table 4 Spearman correlation analysis of heavy metal content in *Astragalus*

元素	汞	铜	砷	镉	铅
汞	1.000				
铜	0.250	1.000			
砷	0.058	0.410 **	1.000		
镉	0.091	0.330 *	0.510 **	1.000	
铅	-0.100	0.110	0.360 **	0.400 **	1.000

<sup>†</sup> \* 为  $P<0.05$ ; \*\* 为  $P<0.01$ 。

0.41,0.36,呈显著正相关;镉与铜、铅的相关系数分别为 0.33,0.40,呈显著正相关,表明不同金属元素的积累具有相互促进,共同吸收的关系,具有一定的同质性。

### 2.4 不同产地黄芪中重金属含量比较

由表 5 可知,重金属镉的含量以永登县的样本最高,与除漳县外的其他地区的差异显著( $P<0.05$ );铜和砷两种重金属的含量以漳县的样本含量最高,岷县最低,岷县的样本与其他地区的有统计学差异( $P<0.05$ );汞含量以漳县的样本含量最高,显著高于其他地区的( $P<0.05$ );铅含量以永登县的样本含量最高,但重金属含量测定值中有极端值的出现,数据之间的差异性较大,宕昌和渭源两个县的样本之间有显著统计学差异( $P<0.05$ ),其他地区的样本之间无明显差异。

通过对甘肃省 7 个县区的黄芪样本进行分析,漳县与其他县区存在显著差异( $P<0.05$ )。重金属的来源主要与当地的种植环境有很大关联<sup>[21]</sup>,其次是植物对金属元素的生物浓缩效应。影响种植环境的最基本因素是当

表 5 不同产地黄芪中重金属含量比较<sup>†</sup>Table 5 Comparison of heavy metal content in *Astragalus* from different production areas

产地	镉	铜	砷	汞	铅
永登县	0.047±0.034 <sup>a</sup>	6.000±2.491 <sup>ab</sup>	0.152±0.033 <sup>ab</sup>	0.002±0.000 <sup>bc</sup>	0.232±0.234 <sup>ab</sup>
漳县	0.033±0.022 <sup>ab</sup>	6.760±1.709 <sup>a</sup>	0.176±0.042 <sup>a</sup>	0.101±0.051 <sup>a</sup>	0.119±0.079 <sup>ab</sup>
岷县	0.023±0.016 <sup>b</sup>	3.095±1.752 <sup>c</sup>	0.115±0.049 <sup>b</sup>	0.002±0.001 <sup>c</sup>	0.182±0.220 <sup>ab</sup>
陇西县	0.022±0.005 <sup>b</sup>	5.834±0.623 <sup>ab</sup>	0.151±0.045 <sup>ab</sup>	0.018±0.012 <sup>b</sup>	0.103±0.110 <sup>ab</sup>
宕昌县	0.021±0.006 <sup>b</sup>	5.080±1.438 <sup>ab</sup>	0.163±0.073 <sup>a</sup>	0.002±0.000 <sup>c</sup>	0.219±0.237 <sup>a</sup>
渭源县	0.021±0.006 <sup>b</sup>	4.359±1.138 <sup>b</sup>	0.128±0.031 <sup>ab</sup>	0.004±0.004 <sup>c</sup>	0.056±0.048 <sup>b</sup>
榆中县	0.020±0.004 <sup>b</sup>	5.264±0.970 <sup>ab</sup>	0.157±0.027 <sup>ab</sup>	0.002±0.000 <sup>bc</sup>	0.168±0.192 <sup>ab</sup>

<sup>†</sup> 字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

地的土壤条件,因此不同产地的黄芪呈不同的重金属污染状况。综上,不同产地、不同种植方法以及气温、降水量等气候条件的不同均会影响黄芪的生长,土壤条件、施肥方式、采收年限、加工炮制等环节<sup>[20]</sup>,同样也会不同程度地改变黄芪本身的质量,造成不同程度的重金属污染<sup>[22]</sup>,因此需要在种植及加工源头等环节加以控制。

### 2.5 健康风险评估

由表 6 可知,5 种重金属的 EDI 均小于 PTDI,因此,当以 EDI 为健康风险评估标准时,可以认为服用此次抽检的黄芪样本对人体健康无明显影响。由图 1 和表 6 可知,当以 THQ 作为风险评估标准时,5 种重金属的 THQ 从高到低依次为砷>铜>铅>汞>镉,且 5 种重金属的 THQ 及

其总 THQ 均 $<1$ ,可认为服用此次抽检的黄芪样本不会对暴露人群的人体健康产生明显影响。黄芪中镉、砷、铅 3 种重金属的 LCR 值均 $<1\times 10^{-6}$ ,因此对于成人及儿童,可以认为服用该批次的黄芪样本不会有致癌的风险。

由于不同人群对药材的实际摄入量不同,重金属在人体内的蓄积能力也不同。参考《中国药典》黄芪推荐摄入量,分别取其最大剂量和最小剂量代入评估模型计算成人和儿童的暴露风险。儿童是特殊的用药人群,在耐药性和安全性等方面与成人有较大差异,虽然试验结果显示重金属元素对成人和儿童均不存在健康隐患,也不存在潜在的致癌风险,但是对于黄芪及其他中药材的安全性监管仍不容忽视,以确保人群用药安全。

表 6 黄芪中重金属的平均 EDI、THQ 和 LCR

Table 6 Average EDI, THQ and LCR of heavy metals in *Astragalus*

元素	平均 EDI/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )		平均 THQ		LCR( $\times 10^{-6}$ )	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
镉	$1.27\times 10^{-5}$	$6.52\times 10^{-6}$	$4.48\times 10^{-4}$	$2.30\times 10^{-4}$	0.0027 3	0.001 401 3
砷	$7.48\times 10^{-5}$	$3.84\times 10^{-5}$	$8.78\times 10^{-3}$	$4.51\times 10^{-3}$	0.0039 5	0.002 027 3
铅	$7.95\times 10^{-5}$	$4.07\times 10^{-5}$	$1.87\times 10^{-3}$	$9.57\times 10^{-4}$	0.000 023 8	0.000 012 2
铜	$2.45\times 10^{-3}$	$1.26\times 10^{-3}$	$2.16\times 10^{-3}$	$1.11\times 10^{-3}$		
汞	$5.71\times 10^{-6}$	$2.93\times 10^{-6}$	$6.71\times 10^{-4}$	$3.44\times 10^{-4}$		
合计			$1.39\times 10^{-2}$	$7.14\times 10^{-3}$		

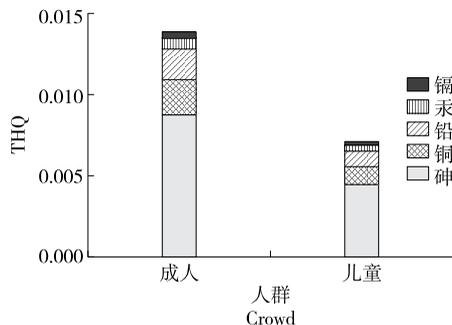


图 1 成人与儿童服用黄芪时摄取重金属的 THQ

Figure 1 THQ of heavy metals ingested by adults and children taking *Astragalus*

### 3 结论

对甘肃省主要产地的黄芪中重金属污染情况进行了调查。结果表明,5 种重金属均有不同程度的检出,铜的检出值最高;主成分分析结果显示,铜、镉和铅是黄芪中的主要污染元素,Spearman 相关性分析显示,5 种重金属之间呈正相关,具有同质性;ANOVA 单因素分析方法结果显示,铜、砷和汞含量以漳县产区的样品含量最高,此产区的黄芪与其他地区的存在显著差异( $P<0.05$ ),表明漳县产区的黄芪安全性应引起重视;通过每日最大可耐受摄入量、靶标危害系数法和终身致癌性风险评估模型对 58 批次黄芪样本进行健康风险评估,对于成人和儿

童,服用该批次黄芪均不存在健康风险和致癌风险。后续可合理规划样品采集的数量,增加对黄芪中微量元素、活性物质等的检测。

### 参考文献

- [1] 王玲玲,王博,熊丰,等.不同产地蒙古黄芪矿物元素比较研究[J].光谱学与光谱分析,2022,42(5):1407-1412.  
WANG L L, WANG B, XIONG F, et al. A comparative study of inorganic elements in cultivating *Astragalus membranaceus* from different habitat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(5): 1407-1412.
- [2] 张亚红,朱慧丽,田永昌,等.黄芪原药材及饮片中7种金属含量分析[J].食品安全质量检测学报,2020,11(3):777-782.  
ZHANG Y H, ZHU H L, TIAN Y C, et al. Analysis of the contents of 7 metals in the original medicinal materials and decoction pieces of *Astragalus membranaceus*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(3): 777-782.
- [3] 张记,彭桂兰,张雪峰,等.黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究[J].食品与机械,2020,36(8):22-28,56.  
ZHANG J, PENG G L, ZHANG X F, et al. Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of *Astragalus* slice[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [4] ZHU Y, WANG S, XU X, et al. Exposure assessment and risk-based limit levels evaluation of ochratoxin A in *Astragali Radix* in China[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2022, 237: 113517.
- [5] 毛琳璐,孙朋圭,张霞,等.连续逆流提取黄芪多糖过程扩散返混数值模型的构建及单元化验证[J].食品与机械,2020,36(1):42-49.  
MAO L L, SUN P Y, ZHANG X, et al. Construction and unitization verification of diffusion and backmixing model for continuous countercurrent extraction of *Astragalus polysaccharide*[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 42-49.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.关于对党参等9种物质开展按照传统既是食品又是中药材的物质管理试点工作的通知[EB/OL].(2019-11-25)[2022-12-24].<http://www.nhc.gov.cn/sps/s7885/202001/1ec2cca04146450d9b14acc2499d854f.shtml>.  
National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on carrying out the pilot work of material management of 9 substances including codonopsis pilosula according to the tradition of both food and Chinese herbal medicine[EB/OL].(2019-11-25)[2022-12-24].<http://www.nhc.gov.cn/sps/s7885/202001/1ec2cca04146450d9b14acc2499d854f.shtml>.
- [7] 杨祎辰,王二欢,王继强,等.甘肃不同产地黄芪药材的活性成分对比研究[J].安徽农业科学,2021,49(17):161-164,188.  
YANG Y C, WANG E H, WANG J Q, et al. Comparative study of active ingredients of *Astragalus membranaceus* from different origins in Gansu[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(17): 161-164, 188.
- [8] 王婷,冯彦梅,丁小琴,等.甘肃不同产区黄芪有效成分含量比较研究[J].中兽医医药杂志,2021,40(5):47-50.  
WANG T, FENG Y M, DING X Q, et al. Comparative study on the content of active components of *Astragalus membranaceus* from different regions in Gansu Province [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2021, 40(5): 47-50.
- [9] 王瑛,张祖维,巩强,等.恒山黄芪重金属污染物含量的评估[J].大众标准化,2021(9):5-8.  
WANG Y, ZHANG Z W, GONG Q, et al. Evaluation of heavy metal pollutant content in Hengshan *Astragalus* [J]. Popular Standardization, 2021(9): 5-8.
- [10] ZHANG Z, SONG J, ZHANG H, et al. Analysis method development and health risk assessment of pesticide and heavy metal residues in *Dendrobium Candidum*[J]. RSC Adv, 2022, 12(11): 6869-6875.
- [11] SUI M, KONG D, RUAN H, et al. Distribution characteristics of nutritional elements and combined health risk of heavy metals in medicinal tea from genuine producing area of China[J]. Biol Trace Elem Res, 2023, 201: 984-994.
- [12] BOUDEBBOUZ A, BOUDALIA S, BOUSBIA A, et al. Determination of heavy metal levels and health risk assessment of raw cow milk in Guelma Region, Algeria[J]. Biol Trace Elem Res, 2023, 201: 1704-1716.
- [13] 李晓琦,王琪,陈彦.不同产地栀子中重金属的含量测定及健康风险评估[J].中华中医药杂志,2022,37(2):1041-1046.  
LI X Q, WANG Q, CHEN Y. Determination and risk assessment of heavy metals in *Fructus Gardeniae* of different habitats[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2022, 37(2): 1041-1046.
- [14] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020:315.  
State Pharmacopoeia Committee. Chinese pharmacopoeia: Part 1 [M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020: 315.
- [15] 姚姣姣,孔丹丹,骆骄阳,等.膜荚黄芪中重金属污染分析及其健康风险评估[J].中国中药杂志,2019,44(14):3094-3099.  
YAO J J, KONG D D, LUO J Y, et al. Safety evaluation of heavy metals contaminated *Astragalus membranaceus* using health risk assessment model[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(14): 3094-3099.
- [16] 隋鸣,孔丹丹,丁淑敏,等.中药中外源性污染物的健康风险评估研究进展[J].中国中药杂志,2021,46(21):5593-5599.  
SUI M, KONG D D, DING S M, et al. Health risk assessment of exogenous harmful pollutants in Chinese medicine: A review[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(21): 5593-5599.
- [17] 王丽,许华杰,李海丽,等.茂名地区主要水产品汞含量分析与风险评估[J].食品与机械,2021,37(9):73-77.  
WANG L, XU H J, LI H L, et al. Mercury content analysis and risk assessment of major aquatic products in Maoming [J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 73-77.

(下转第 69 页)

- [10] 刘硕, 王景召. 透明质酸的特性及其在食品中的应用[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(8): 62.  
LIU S, WANG J Z. Characteristics of hyaluronic acid and its application in food [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(8): 62.
- [11] 国家卫生健康委. 关于蝉花子实体(人工培植)等 15 种“三新食品”的公告(2020 年第 9 号)[J]. 饮料工业, 2021, 24(1): 4-6. National Health Commission of the People's Republic of China. Announcement on 15 "three new foods" including cicada flower fruiting body (artificial cultivation) (No. 9 in 2020) [J]. Beverage Industry, 2021, 24(1): 4-6.
- [12] 宋东宇, 王若贤, 李硕, 等. 透明质酸钠功能机理及在食品中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2022(1): 162-165.  
SONG Y D, WANG R X, LI S, et al. Functional mechanism of sodium hyaluronate and its utilization in food [J]. China Food Safety Magazine, 2022(1): 162-165.
- [13] 王胜男, 宫建辉, 徐照明, 等. 透明质酸钠功能机制及其在食品中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2022(11): 181-183.  
WANG S N, GONG J H, XU X M, et al. The functional mechanism of sodium hyaluronate and its application in food [J]. China Food Safety Magazine, 2022(11): 181-183.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 固体饮料: GB/T 29602—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Solid beverages: GB/T 29602—2013 [S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2014.
- [15] 万秀玉, 白若琬, 姜雯, 等. 咪唑法同时测定玻璃酸钠和硫酸软骨素的含量[J]. 药学实践杂志, 2009, 29(4): 282-283.  
WANG X Y, BAI R W, JIANG W, et al. Carbazole method for simultaneous determination of sodium hyaluronate and chondroitin sulfate [J]. Journal of Pharmaceutical Practice, 2009, 29(4): 282-283.
- [16] 李敏, 侯增森, 李晓颖, 等. 改良咪唑法测定重组人溶酶菌滴眼液中透明质酸钠的含量[J]. 化学分析计量, 2019, 28(1): 95-98.  
LI M, HOU Z M, LI X Y, et al. Determination of sodium hyaluronate in recombinant human lysozyme eye drops by modified carbazole method [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2019, 28(1): 95-98.
- [17] 程伟. 浓度对凝胶色谱法测定低分子透明质酸钠分子量的影响[J]. 科技信息, 2010(34): 222.  
CHENG W. Effect of concentration on determination of molecular weight of low molecular sodium hyaluronate by gel chromatography [J]. Science & Technology Information, 2010(34): 222.
- [18] 张莉, 赵鹏, 何涛, 等. 高效凝胶色谱法同时测定眼用粘弹剂中透明质酸钠和硫酸软骨素的含量[J]. 理化检验(化学分册), 2018, 54(3): 260-263.  
ZHANG L, ZHAO P, HE T, et al. Simultaneous determination of sodium hyaluronate and sodium chondroitin sulfate in eye viscoelastic agents by high performance gel chromatography [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2018, 54(3): 260-263.
- [19] 韩志辉, 张艳芳, 杨耀群. 藏红 T 共振瑞利散射光谱法测定保健食品中的透明质酸钠[J]. 化学分析计量, 2017, 26(2): 63-66.  
HAN Z H, ZHANG Y F, YANG Y Q. Determination of sodium hyaluronate in health food with safranine T resonance rayleigh scattering method [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2017, 26(2): 63-66.
- [20] 杨桂兰, 郭学平, 栾贻宏. 不同相对分子质量透明质酸钠的应用[J]. 食品与药品, 2005, 7(12): 1-3.  
YANG G L, GUO X P, LUAN Y H. Applications of sodium hyaluronate with different relative molecular mass [J]. Food and Drug, 2005, 7(12): 1-3.
- (上接第 42 页)
- [18] 屈江玲, 汤华成, 曹冬梅. 红小豆中精喹禾灵及其代谢物残留测定和膳食风险评估[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 84-88.  
QU J L, TANG H C, CAO D M. Residue and dietary risk assessment of quizalofop-p-ethyl and its metabolites in adzuki bean [J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 84-88.
- [19] VAROL M, GÜLDEREN K K, ALP A. Heavy metal and arsenic concentrations in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farmed in a dam reservoir on the Firat (Euphrates) River: Risk-based consumption advisories [J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 1 288-1 296.
- [20] 孔丹丹, 李欲悦, 闫卉欣, 等. 药食两用植物药中重金属污染及其健康风险评估模型的建立: 以黄芪、党参、昆布为例[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5 042-5 050.  
KONG D D, LI X Y, YAN H X, et al. Establishment of health risk assessment model for assessing medicinal and edible plants contaminated by heavy metals: Take Astragali Radix, Codonopsis Radix and Laminariae Thallus as examples [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(23): 5 042-5 050.
- [21] 吴建杰, 骆骄阳, 谷善勇, 等. 柴胡饮片中重金属生物可给性研究及其风险评估[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(22): 4 479-4 485.  
WU J J, LUO J Y, GU S Y, et al. Estimation of bioaccessibility and risk assessment of heavy metals indecoction pieces of Bupleuri Radix [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(22): 4 479-4 485.
- [22] 秦双双, 黄静雯, 袁媛, 等. 中药材重金属元素及其与指标性成分相关性分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(6): 66-70.  
QIN S S, HUANG J W, YUAN Y, et al. Correlation analysis of heavy metals and index components in traditional Chinese medicinal materials [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2018, 24(6): 66-70.