DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250916005
引用格式: 尹素娟, 骆航, 孙兴力. 不同产地多花黄精重金属污染及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 341–349.
YIN SJ, LUO H, SUN XL. Heavy metal pollution and health risk assessment of *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 341–349. (in Chinese with English abstract).

不同产地多花黄精重金属污染及健康风险评估

尹素娟*, 骆　航, 孙兴力

(永州职业技术学院, 永州　425100)

摘　要: 目的　对不同产地的多花黄精残留的 6 种重金属进行重金属检测和健康风险评估。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱法测定不同产地多花黄精的重金属残留量, 采用每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)、靶向危害系数(target hazard quotients, THQ)和终身致癌性风险(lifetime cancer risk, LCR)对不同产地黄精进行健康风险评估。**结果**　对比中国药典及其他国家对黄精重金属限定标准, 不同产地黄精重金属 As、Cu 均未超标, 其中尚书礼、蓉城、旌德、西华 4 个产地黄精 Cd 超国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)标准, 尚书礼、蓉城、西华、施恩 4 个产地黄精 Pb 超药典标准; 但其他国家相比, 10 个产地 Cd 有不同程度超标; Pb 超 4 国标准; 对比加拿大和美国重金属 Cr 标准, 15 个产地均超标。EDI 除 Cd 在尚书礼、蓉城和西华产黄精, 其值为 0.001301、0.001190、0.002751 超出每日暂定可耐受摄入量(provisional tolerable daily intake, PTDI)的限定值 0.00083 外, 其余黄精样品中的重金属均未超出 PTDI 的限定值; THQ 分析显示单一重金属元素除 Hg 在尚书礼产黄精, 其值为 1.172466, 存在非致癌风险外, 其余样点中的风险水平均小于 1。对于总的非致癌风险, 在尚书礼和西华分别达到了 1.240582 和 1.476055, 说明黄精的摄入可能会引发重金属的非致癌风险, 而其余样点均不存在风险。对于致癌风险显示, 较多点位存在不可接受的致癌风险。**结论**　重金属的 EDI 指数和非致癌风险指数的评估结果显示黄精中重金属对人体的健康风险较小, 但进行致癌风险评估时, 发现较多点位存在不可接受的致癌风险。因此, 需要重视黄精重金属污染问题, 加强重金属的检测, 进而保证中药安全, 维护人类生命健康。

关键词: 多花黄精; 重金属; 污染程度; 健康风险评估

Heavy metal pollution and health risk assessment of *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas

YIN Su-Juan*, LUO Hang, SUN Xing-Li

(*Yongzhou Vocational Technical College*, *Yongzhou* 425100, *China*)

ABSTRACT: Objective　To detect the residues of 6 kinds of heavy metals in *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas and conduct health risk assessment. **Methods**　Inductively coupled plasma mass spectrometry was used to determine the heavy metal residues in *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas. The estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ) and lifetime cancer risk (LCR) were applied to

收稿日期: 2025-09-16
基金项目: 永州市 2024 年度指导性科技计划项目(2024YZ033)
第一作者/*通信作者: 尹素娟(1988—), 女, 讲师, 主要研究方向为中药工艺加工。E-mail: 912761609@qq.com

evaluate the health risks of *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas. **Results** Compared with the heavy metal limit standards of the Chinese pharmacopoeia and other countries, the levels of As and Cu in *Polygonatum cyrtonema* from different producing areas did not exceed the standards. Among them, the Cd content in *Polygonatum cyrtonema* from 4 producing areas (Shang Shuli, Rongcheng, Jingde, Xihua) exceeded the International Organization for Standardization (ISO) standard, and the Pb content in *Polygonatum cyrtonema* from 4 producing areas (Shang Shuli, Rongcheng, Xihua, Shien) exceeded the standard specified in the Chinese pharmacopoeia. However, when compared with standards of other countries, the Cd content in *Polygonatum cyrtonema* from 10 producing areas exceeded the standards to varying degrees, and the Pb content exceeded the standards of 4 countries. In comparison with the chromium (Cr) standards of Canada and the United States, the Cr content in *Polygonatum cyrtonema* from all 15 producing areas exceeded the limits. For the EDI, except for the Cd in *Polygonatum cyrtonema*from Shang Shuli, Rongcheng and Xihua (with values of 0.001301, 0.001190 and 0.002751 respectively, which exceeded the provisional tolerable daily intake (PTDI) limit of 0.00083, the heavy metal content in other *Polygonatum cyrtonema* samples did not exceed the PTDI limits. The target hazard quotient (THQ) analysis showed that, except for Hg in *Polygonatum cyrtonema* from Shang Shuli (with a value of 1.172466, indicating a non-carcinogenic risk), the risk levels of other single heavy metal elements in all sample sites were less than 1. Regarding the total non-carcinogenic risk, the values in Shang Shuli and Xihua reached 1.240582 and 1.476055 respectively, suggesting that the intake of *Polygonatum cyrtonema* from these two areas may pose non-carcinogenic risks due to heavy metals, while no such risks existed in other sample sites. For carcinogenic risks, unacceptable carcinogenic risks were found in a large number of sample sites. **Conclusion** The assessment results of EDI and non-carcinogenic risk index of heavy metals show that the health risks of heavy metals in *Polygonatum cyrtonema* to humans are relatively low. However, in the carcinogenic risk assessment, unacceptable carcinogenic risks are found in many producing areas. Therefore, it is necessary to attach importance to the heavy metal pollution of *Polygonatum cyrtonema*, strengthen the detection of heavy metals, so as to ensure the safety of traditional Chinese medicine and protect human life and health.

KEY WORDS: *Polygonatum cyrtonema*; heavy metals; pollution degree; health risk assessment

0 引 言

重金属是一类具有潜在危害生态及人体健康的污染物[1], 通过与体内的蛋白质结合, 导致器官功能发生紊乱或丧失, 也可侵害神经系统, 导致瘫痪[2]。重金属污染具有致癌性、可移动性、隐蔽性、长期性, 严重威胁人类健康。重金属健康风险评估是评估中药中重金属含量能否危害人体健康的重要方法[3]。健康风险评价的方法有每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)[4]、靶标危害系数法(target hazard quotients, THQ)和终身致癌性风险(lifetime cancer risk, LCR)[5]。其中 EDI 通过膳食、饮水或特定途径(如食用中药材)实际摄入某种物质(如重金属)的估算量, 在中药材重金属安全性评估中常结合使用[6]。THQ 是一种用于评估人体暴露于某种污染物(如重金属)时非致癌风险的常用方法。LCR 是指特定暴露途径(如呼吸、饮食、皮肤接触)摄入致癌物质后, 发生癌症的“额外风险”(需排除遗传、生活习惯等其他致癌因素的基础风险)。

黄精又名气精、黄芝、笔管菜、野仙姜, 至今已有 2000 多年历史[7], 是临床常用的药食同源类中药。目前全球黄精属植物共 327 种[8], 我国黄精属植物有 79 种[9], 中国药典收录的有滇黄精(*Polygonatum kingianum*)、黄精(*Polygonatum sibiricum*)和多花黄精(*Polygonatum cyrtonema*)[10]。现代研究表明, 黄精具有增强免疫力[11]及抗肿瘤活性, 在保健品方面逐渐得到广泛应用[12]。随着黄精药用价值和经济价值的不断提升, 野生黄精资源因过度采挖而日益减少, 且野生黄精生长缓慢, 需历经数年才能达到药用标准。为了满足市场需求, 黄精开始人工化种植。目前, 我国中药材人工种植尚未达到规范化种植[13−14], 在中药材种植中, 为提升产量而采取过多非科学人工干预(如滥用农药、误用含重金属农资), 导致土壤和中药中农药残留和重金属富集甚至超标[15]。当前, 标准执行与监管的漏洞、产业对国际环境的适应性不足, 已成为制约中药国际化的关键因素[16]。中国药典对黄精进行重金属检查, 但是重金属检查的风险评估尚未建立。为了更好地推动药食同源黄精国际化进程, 本研究选择 15 个不同地区的多花黄精, 通过检测样本中砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)以及铜(Cu)、汞(Hg) 6 种重金属含量并进行健康风险评估, 为黄精质量控制和市场监管提供靶向指引, 推动黄精国际化进程。

1　材料与方法

1.1　仪器和设备

Hermo XSefies 2 电感耦合等离子体质谱仪(最小可达到 ppb 数量级即 μg/kg, 美国热电公司); Milestone ETHOS UP 大微波消解仪(意大利迈尔斯通公司); KL-500B 超纯水系统 RO 反渗透技术水处理设备(山东精诚公司); SCH-1000mL 酸纯化器实验室高纯酸提纯设备(南京滨正红公司); BT25S 万分之一电子精密天平(上海精密科学仪器有限公司); FW100 高能万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)。

1.2　材料与试剂

采集全国 15 个不同地区的黄精(刘清平教授鉴定为多花黄精, 见表 1), 洗净, 切片, 80 ℃烘干, 用高能万能粉碎机打磨成粉, –10 ℃冷冻干燥备用, 平行测定 3 次。

表 1　全国 15 个不同地区黄精

Table 1　*Polygonatum sibiricum* from 15 different regions across the country

样本标号	产地	样标号	产地
S_1	安徽陵阳	S_9	安徽白地
S_2	湖北赤壁	S_{10}	安徽果子园
S_3	安徽绩溪	S_{11}	安徽船冲
S_4	苏州尚书里	S_{12}	湖南新化
S_5	安徽榕城	S_{13}	河南西华
S_6	安徽旌德	S_{14}	湖北施恩
S_7	安徽山口镇	S_{15}	四川绵阳
S_8	安徽贵池		

标准试剂 Pb、Hg、As、Cd、Cu、Cr(纯度 99.99%以上, 国家有色金属及电子材料分析测试中心提供); 硝酸(优纯级, 上海高鸣化工有限公司); 高氯酸(优纯级, 广东胜克生化科技股份有限公司); H_2O_2(优纯级, 无锡市亚泰联合化工有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　样品预处理

精密称量 0.3 g 样品置消解管, 加入 9 mL 优纯级硝酸消解至反应停止。置微波消解仪按程序: 20 min 爬升+20 min 180 ℃下降到 60 ℃以下取出, 进行消解, 消解完成后, 置赶酸器中赶酸处理, 140 ℃赶酸 4 h 左右, 直至溶液变成透明清液[1], 超纯水反复冲洗至 25 mL 容量瓶定容, 摇匀, 定容, 用 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 备用。

1.3.2　对照片溶液的制备

精密配制重金属 Cu 标准品 0、0.1、0.5、1.0、5.0 ppm 5 个浓度点; 精密配制重金属 As、Cd、Cr、Pb、Hg 标准品 0、1、5、10、50 ppb 5 个浓度点[1]。

1.3.3　健康风险评价方法

(1) EDI 评估法

EDI 为计算每日重金属摄入的最大量, 主要用于评估重金属对人体的膳食风险[17], 其计算公式(1)如下:

$$\mathrm{EDI}=\frac{C\times \mathrm{IRD}}{\mathrm{BM}} \tag{1}$$

式中: C 为药材中重金属质量分数, mg/kg; BM 为人的平均体质量(body mass), 此处采用国际通用标准体重为 60 kg; IRD 是每日摄入药材量(ingestion rate daily), 此处取最大摄入量; 根据《中国药典》2020 年版(一部)规定, 黄精的 IRD 为 15 g[10]。

(2) THQ 评估法

采用 THQ 评估中药材中的重金属对人体的健康危害[18], THQ 为靶标危害系数, 其中 THQ≤1, 表示健康风险可接受, THQ>1, 表示存在潜在的健康风险[19], 按照公式(2)计算:

$$\mathrm{THQ}=\frac{C\times \mathrm{EF}\times \mathrm{ED}\times \mathrm{IRD}}{\mathrm{BW}\times \mathrm{AT}\times \mathrm{RFD}} \tag{2}$$

式中: EF 为每年暴露于毒物天数(exposure frequency)(设定为 30 d); ED 为暴露于毒物的年数(exposure duration)(30 年); AT 为平均接触非致癌毒物(此处为中药材)的时间(average time), 取人平均寿命 70 年×365; BW 为人体平均体质量(body weight), 此处采用国际通用标准为 60 kg[20]; RFD 为参考剂量(reference dose), 参考美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)设置的日参考剂量为: Cu 0.04 μg/g, As 0.0003 μg/g, Cd 0.001 μg/g, Hg 0.0003 μg/g, 参考欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)设置 Pb 日参考量为 0.0015 μg/g[21]。

(3)致癌风险、LCR 评估法

CR 是单个致癌性重金属通过药材摄入对人体产生的致癌风险(carcinogenic risk)[22], 按照公式(3)计算。TCR 是药材中所有具有致癌性的重金属(需排除非致癌重金属(total carcinogenic risk), 如铅通常归为“非致癌/低致癌性”不纳入)的 CR 值之和, 反映整体致癌风险, 按照公式(4)计算[23]:

$$\mathrm{CR}=\mathrm{CDI}\times \mathrm{CSF} \tag{3}$$

$$\mathrm{TCR}=\Sigma \mathrm{CR}_i=\mathrm{CR}_1+\mathrm{CR}_2+\mathrm{CR}_3+\cdots+\mathrm{CR}_n \tag{4}$$

式中: CDI 为慢性日摄入量(chronic daily intake), mg/(kg・d), 即个体每天通过特定途径摄入的致癌物质量(mg)与体重(kg)的比值, 反映“长期日均暴露水平”; CSF 为致癌斜率因子(carcinogenic slope factor), (kg・d)/mg, 由权威机构基于动物实验、流行病学数据推导, 代表“单位剂量致癌物引发癌症的概率斜率”; CSF 值越高, 该物质致癌性越强[如砷的 CSF 约为 1.5 (kg・d)/mg, 远高于镉的 0.38 (kg・d)/mg, 说明同等剂量下砷的致癌风险更高]。CR_i 为第 $_i$ 种致癌性重金属的单一致癌风险。

1.4　数据处理

数据的输入、处理, 采用 Microsoft Office Excel 2016, 绘图采用 Origin2021, 运用 USEPA 健康风险评估模型对黄精中重金属进行风险评估。

2 结果与分析

2.1 不同产地黄精重金属含量

经检测统计, 不同产地黄精重金属含量见表 2。由表 2 可知, S_{15}产黄精 As 含量最高, 为 1.820 mg/kg; S_{13}产黄精 Cd、Pb 含量最高 11.005 mg/kg、17.602 mg/kg; S_{15}产黄精 Cr 含量最高, 为 13.619 mg/kg; S_{13}产黄精 Cu 含量最高, 为 8.803 mg/kg。

2.2 黄精中重金属每日摄入量

EDI 为黄精中重金属的每日最大可耐受摄入量, 通过计算得到的 EDI 与每日暂定可耐受摄入量(provisional tolerable daily intake, PTDI)对比, 可以得出服用黄精可能导致的健康风险水平。参照前人研究设置 Pb、Cr、As、Cd、Cu 和 Hg 的 PTDI 分别为 0.00357、0.0048、0.00214、0.00083、0.50000 和 0.00057 mg/(kg·d)[24–27]。当 EDI<PTDI 时, 则认为人体摄入的重金属无显著的健康风险。表 3 显示, 除 Cd 在 S_4、S_5和 S_{13}的样品中分别为 0.001301、0.001190、0.002751 超出 PTDI 的限定值 0.00083 外, 其余黄精样品中的重金属均未超出 PTDI 的限定值。因此, 以 EDI 来作为人体健康风险的评估指标时, 除 Cd 外的其余重金属并不会引发明显的健康风险。

表 2 不同产地黄精重金属含量表(mg/kg)

Table 2 Heavy metal contents of *Polygonatum sibiricum* from different areas (mg/kg)

样品编号	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg
S_1	0.026	0.026	0.206	1.089	3.835	0.056
S_2	0.031	0.305	0.658	0.516	7.409	0.078
S_3	0.110	0.128	0.646	1.329	4.558	0.076
S_4	1.289	5.204	12.902	13.619	5.142	1.902
S_5	0.431	4.760	10.114	5.314	2.678	1.114
S_6	0.516	2.214	2.621	1.858	6.534	0.081
S_7	0.506	0.587	1.262	6.086	6.523	0.082
S_8	0.032	0.045	0.039	0.369	6.619	0.019
S_9	0.040	0.062	0.072	0.618	6.923	0.013
S_{10}	0.016	0.295	0.105	0.965	3.254	0.035
S_{11}	0.043	0.147	0.176	0.972	3.749	0.046
S_{12}	0.166	0.255	0.622	0.609	3.767	0.022
S_{13}	1.478	11.005	17.602	5.528	8.803	1.602
S_{14}	1.419	0.286	5.419	11.154	4.386	0.219
S_{15}	1.820	0.934	4.379	13.712	3.769	0.379

表 3 黄精中重金属每日摄入量

Table 3 Daily intake of heavy metals in *Polygonatum sibiricum*

样品编号	EDI-Pb	EDI-Cr	EDI-As	EDI-Cd	EDI-Cu	EDI-Hg
S_1	0.0000515	0.000272	0.0000065	0.000007	0.000959	0.0000140
S_2	0.0001645	0.000129	0.0000078	0.000076	0.001852	0.0000195
S_3	0.0001615	0.000332	0.0000275	0.000032	0.001140	0.0000190
S_4	0.0032255	0.003405	0.0003220	0.001301	0.001286	0.0004760
S_5	0.0025285	0.001329	0.0001080	0.001190	0.000670	0.0002790
S_6	0.0006553	0.000465	0.0001290	0.000554	0.001634	0.0000205
S_7	0.0003155	0.001522	0.0001270	0.000147	0.001631	0.0000205
S_8	0.0000096	0.000092	0.0000080	0.000011	0.001655	0.0000046
S_9	0.0000180	0.000155	0.0000100	0.000016	0.001731	0.0000030
S_{10}	0.0000260	0.000241	0.0000040	0.000074	0.000814	0.0000088
S_{11}	0.0000440	0.000243	0.0000108	0.000037	0.000937	0.0000115
S_{12}	0.0001556	0.000152	0.0000415	0.000064	0.000942	0.0000055
S_{13}	0.0044005	0.001382	0.0003700	0.002751	0.002201	0.0004010
S_{14}	0.0013548	0.002789	0.0003550	0.000072	0.001097	0.0000548
S_{15}	0.0010948	0.003428	0.0004550	0.000234	0.000942	0.0000945

2.3　黄精中重金属非致癌健康风险评估

对于非致癌风险, THQ 表示药材中单一重金属对人体的非致癌风险, HI 表示所有重金属对人体非致癌风险的总和。当 THQ 和 HI<1 时, 认为重金属的摄入不会对人体引发非致癌健康风险, >1 时则认为存在非致癌风险。结果如表 4 所示, 单一重金属元素除 Hg 在 S_4 样点 1.172466 存在非致癌风险外, 其余样点中的风险水平均小于 1。对于总的非致癌风险, 在 S_4 和 S_{13} 分别达到了 1.240582 和 1.476055, 说明黄精的摄入可能会引发重金属的非致癌风险, 而其余样点均不存在风险(图 1)。

表 4　黄精中重金属非致癌健康风险评估

Table 4　Assessment of non-carcinogenic health risks of heavy metals in *Polygonatum sibiricum*

样品编号	THQ-Pb	THQ-Cr	THQ-As	THQ-Cd	THQ-Cu	THQ-Hg	HI
S_1	0.003628	0.033565	0.005342	0.001603	0.005910	0.034521	0.050049
S_2	0.011589	0.015904	0.00637	0.018801	0.011418	0.048082	0.064082
S_3	0.011378	0.040962	0.022603	0.007890	0.007024	0.046849	0.089857
S_4	0.227237	0.419764	0.264863	0.320795	0.007924	1.172466	1.240582
S_5	0.178133	0.163788	0.088562	0.293425	0.004127	0.686712	0.728034
S_6	0.046162	0.057267	0.106027	0.136479	0.010070	0.049932	0.356006
S_7	0.022227	0.187582	0.103973	0.036185	0.010053	0.050548	0.360019
S_8	0.000687	0.011373	0.006575	0.002774	0.010201	0.011712	0.031610
S_9	0.001268	0.019048	0.008219	0.003822	0.010669	0.007397	0.043026
S_{10}	0.001849	0.029743	0.003288	0.018185	0.005015	0.021575	0.058080
S_{11}	0.003100	0.029959	0.008836	0.009062	0.005778	0.028356	0.056734
S_{12}	0.010955	0.018771	0.034110	0.015719	0.005805	0.013562	0.085360
S_{13}	0.310016	0.170384	0.303699	0.678390	0.013566	0.987534	1.476055
S_{14}	0.095442	0.343788	0.291575	0.017630	0.006759	0.135000	0.755195
S_{15}	0.077125	0.422630	0.373973	0.057575	0.005808	0.233630	0.937112

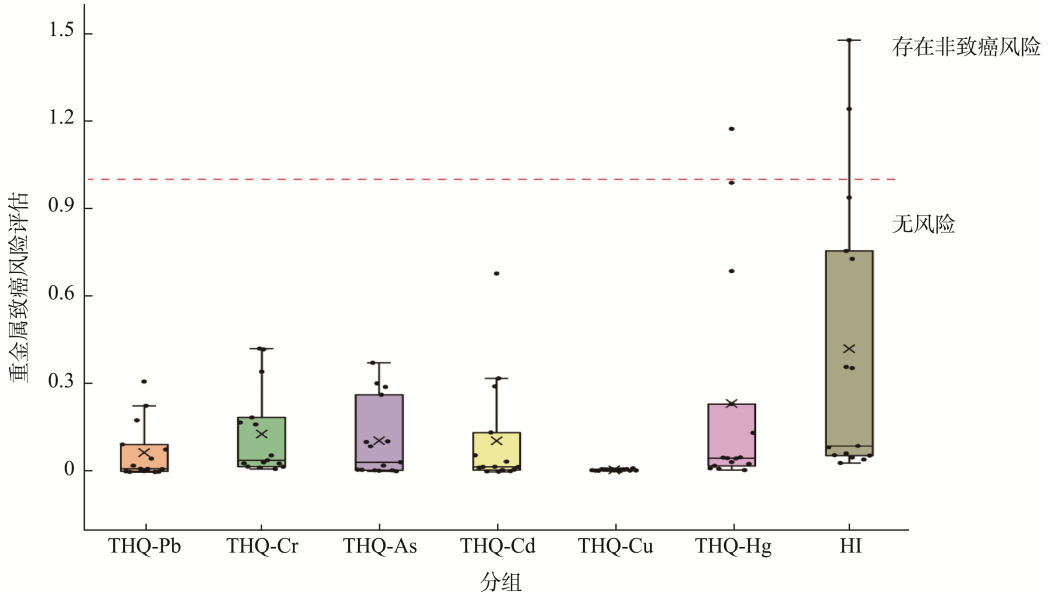


图 1　黄精中重金属非致癌健康风险评估图

Fig.1　Diagram of non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in *Polygonatum sibiricum*

2.4 黄精中重金属致癌风险

对于致癌风险，CR 表示药材中单一重金属对人体的致癌风险，TCR 表示所有重金属对人体致癌风险的总和。当CR和TCR<10^{-6}时表示重金属元素的致癌风险是可以忽略的，当 CR 和 TCR>10^{-6}且<10^{-4}时表示重金属元素的致癌风险在可接受范围内，当CR和TCR>10^{-4}时说明存在不可受的致癌风险。计算结果如表 5 所示，Pb 的致癌风险是可以忽略的，只有在部分点位存在可接受的风险。Cr、As 和 Cd 的致癌风险集中在可接受范围内，但 Cd 和 Cr 在部分点位存在不接受的致癌风险，同时，Cd 致癌风险的平均值超出了 10^{-4}需要引起注意。从总的致癌风险来看，较多点位存在不可接受的致癌风险(图 2)。

表 5 黄精中重金属致癌风险

Table 5 Carcinogenic risks of heavy metals in *Polygonatum sibiricum*

样品编号	CR-Pb	CR-Cr	CR-As	CR-Cd	TCR
S_1	3.0840E-08	9.59E-06	6.87E-07	2.79335E-06	1.31011E-05
S_2	9.8507E-08	4.54E-06	8.19E-07	3.27681E-05	3.82296E-05
S_3	9.6710E-08	1.17E-05	2.91E-06	1.37519E-05	2.84582E-05
S_4	1.9315E-06	1.20E-04	3.41E-05	5.59099E-04	7.15017E-04
S_5	1.5141E-06	4.68E-05	1.14E-05	5.11397E-04	5.71094E-04
S_6	3.9238E-07	1.64E-05	1.36E-05	2.37864E-04	2.68251E-04
S_7	1.8893E-07	5.36E-05	1.34E-05	6.30652E-05	1.30217E-03
S_8	5.8386E-09	3.25E-06	8.45E-07	4.83464E-06	8.93539E-06
S_9	1.0779E-08	5.44E-06	1.06E-06	6.66106E-06	1.31709E-05
S_{10}	1.5719E-08	8.50E-06	4.23E-07	3.16937E-05	4.06302E-05
S_{11}	2.6348E-08	8.56E-06	1.14E-06	1.57932E-05	2.55152E-05
S_{12}	9.3117E-08	5.36E-06	4.39E-06	2.73963E-05	3.72379E-05
S_{13}	2.6351E-06	4.87E-05	3.90E-05	1.18234E-03	1.27270E-03
S_{14}	8.1126E-07	9.82E-05	3.75E-05	3.07268E-05	6.72510E-04
S_{15}	6.5556E-07	1.21E-04	4.81E-05	1.00346E-04	2.69835E-04

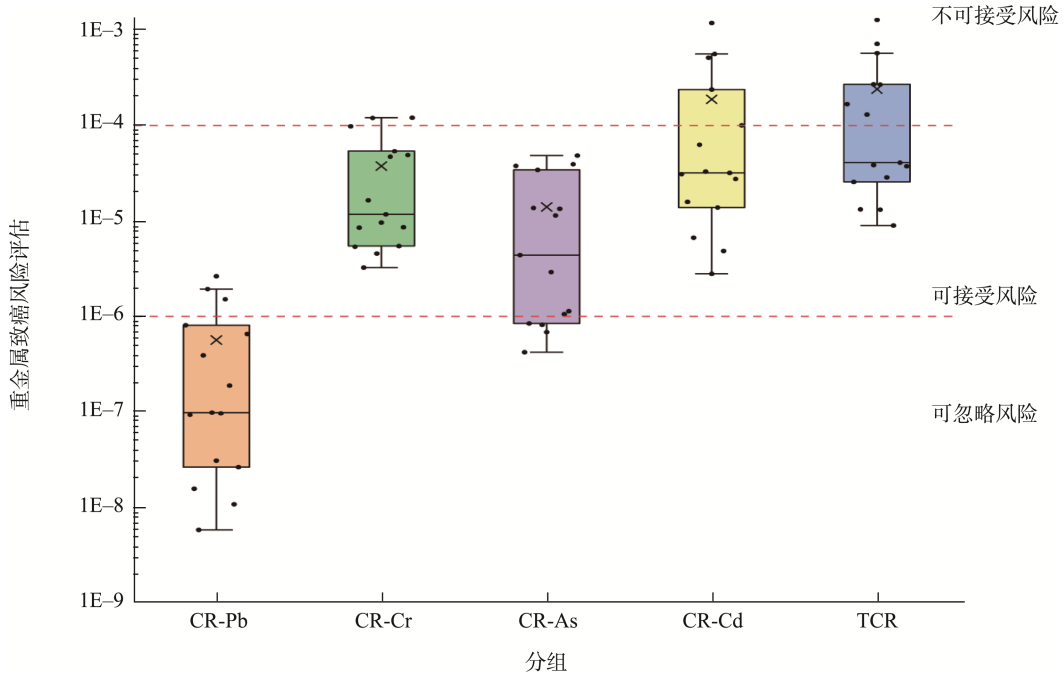


图 2 黄精中重金属致癌风险图

Fig.2 Diagram of carcinogenic risks of heavy metals in *Polygonatum sibiricum*

3　讨论与结论

3.1　讨　论

黄精属药食同源, 中国药典对黄精 As、Pb、Cd、Cr 和 Cu 等重金属做了限量检查。根据全球不同国家及 WHO 对中药材的重金属限量检查及中药材重金属的国际标准(表 6)[28]可知, 对于表 2 各产地重金属含量表, 其中的 As 元素最高的是 S_{15}, 但小于药典标准, 同时也小于其他标准限量; 对比 Cd 标准, S_4、S_5、S_6、S_{13} 4 个产地均超药典限量标准; 对比德国、法国的标准, 本次样本只有 5 个地方合格, 其余地方的 Cd 均不同程度地超过该国限定; 对比 Pb 标准, S_4、S_5、S_{13}、S_{14} 均超过药典中 Pb 的限定, 但均未超过日本标准; 对比 Cr 元素, 中国药典并没有规定, 对照美国和加拿大标准, 15 个地区样本均超标, 可能跟使不锈钢器具有一定关系[29]; 对比 Cu 标准, 15 个地区样本均未超过药典标准。

同时, 本研究对于符合药典规定的中药进行健康评估显示, 人体健康风险评估显示见表 7、8。

表 6　各个国家和地区中药材重金属限量标准(mg/kg)

Table 6　Heavy metal limit standards for chinese medicinal materials in various countries and regions (mg/kg)

元素	中国	德国	法国	英国	加拿大	美国	WHO	日本	越南	ISO
As	≤2	-	-	≤5	≤5	≤5	-	≤5	≤4	≤4
Cd	≤0.3	≤0.2	≤0.2	≤1	≤0.3	≤0.3	≤0.3	-	≤1	≤2
Pb	≤5	≤5	≤5	≤5	≤10	≤10	≤10	≤20	≤10	≤10
Cr	-	-	-	-	≤0.2	≤0.2	-	-	-	-
Cu	≤20	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注: -表示无此数据。

表 7　重金属污染指数

Table 7　Index of heavy metal pollution

项目	Pb	Cr	Hg	As	Cu	内梅罗综合污染指数
最大值	0.100	0.200	0.150	0.450	0.350	0.333
最小值	0	0	0	0	0.100	0.084
平均值	0.029	0.091	0.043	0.128	0.148	0.173
评价等级	优良	优良	优良	优良	优良	安全

表 8　人体健康风险评估

Table 8　Assessment of human health risk

项目	THQ-Pb	THQ-Cr	THQ-Hg	THQ-As	THQ-Cu	HI
最大值	0.036	0.025	0.250	0.225	0.044	0.379
最小值	0	0	0	0	0.013	0.016
平均值	0.010	0.011	0.071	0.064	0.019	0.175

结果显示, 黄精中重金属的污染水平如表 8 所示, 其中 Pb 的单因子污染指数介于 0~0.1 之间, 均值为 0.029; Cr 介于 0~0.2 之间, 均值为 0.091; Hg 介于 0~0.15 之间, 均值为 0.043; As 介于 0~0.45 之间, 均值为 0.128; Cu 介于 0.084~0.333 之间, 均值为 0.173。总体而言, 单因子污染评价指数表明各样品均处于优良等级, 不存在单一重金属元素污染。各样品中重金属的综合内梅罗污染指数介于 0.084~0.333 之间, 均值为 0.173, 处于安全等级。以上结果说明, 重金属在药典规定范围内的黄精不存在重金属污染情况。

THQ 为黄精中单一重金属元素对人体的健康风险, HI 为 6 种重金属元素对人体的健康风险之和。当 THQ (HI)<1 时, 表明重金属元素对人体的健康风险可以接受, 当 THQ (HI)>1 时则表明存在人体不可接受的健康风险。根据表 8 显示, 按照不同重金属元素对人体健康风险的均值大小排序依次为: Hg>As>Cu>Cr>Pb, 此外, 黄精中重金属的 THQ 和 HI 均小于 1, 没有超出引起人体健康风险的警戒值。因此, 本研究表明, 中药黄精重金属含量只有符合规定的, 其残留的重金属元素才不会对人体造成相关的健康风险。

目前环境、药材自身特性以及生产加工是中药材遭受重金属污染的主要途径。环境主要土壤、水、大气等由于人类的活动或者环境自身的变迁富集到中药材中。方成武等[30]发现丹皮的重金属含量与土壤中重金属含量正相关。YAN 等[31]发现长药景天中 Cd 的含量与土壤中 Cd 含量正相关。药材自身特性是指药材自身主动吸收和富集重金属

元素的效应。顾万红等[32]对甘肃同一基地不同中药材重金属显示不同种类药材中重金属含量各不相同。生产加工过程指在采收、加工、包装、贮存、运输等过程中将重金属带入进中药材中, 以及在种植中药材过程中使用了含有重金属的农药、化肥等。顾兴平等[33]研究了川附子炮制前后重金属含量的变化, 发现炮制后川附子 Cu、As 含量与炮制时的用水有关。薛健[34]发现贮存时用硫磺熏蒸药材会导致砷、汞含量增加。

3.2 结 论

本研究结果显示以 EDI 来作为人体健康风险的评估指标时, 除 Cd 外的其余重金属并不会引发明显的健康风险。THQ 为黄精中单一重金属元素对人体的健康风险, HI 为 5 种重金属元素对人体的健康风险之和。当 THQ (HI)<1 时, 表明重金属元素对人体的健康风险可以接受, 当 THQ (HI)>1 时则表明存在人体不可接受的健康风险。本研究表明, 对于总的非致癌风险, 在 S_4 和 S_{13} 分别达到分别达到了 1.240582 和 1.476055, 说明黄精的摄入可能会引发重金属的非致癌风险, 而其余样点均不存在风险。综合上述风险评价方法, 发现重金属的 EDI 指数和非致癌风险指数的评估结果显示黄精中重金属对人体的健康风险较小, 但进行致癌风险评估时, 发现较多点位存在不可接受的致癌风险。因此, 加强重金属的检测及分险评估, 保证中药安全, 推动中药国际化进程，维护人类生命健康。

参考文献

[1] 陈瑞瑞, 杜李继, 祖艳红, 等. 不同产地黄精中重金属含量差异以及限量标准[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 47(6): 996–1000.
CHEN RR, DU LJ, ZU YH, et al. Differences in heavy metal contents in polygonatum from different producing areas and limit standards [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 47(6): 996–1000.

[2] BRIFFA J, SINAGRA E, BLUNDELL R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans [J]. Heliyon, 2020, 6(9): 4691.

[3] 孙兆帅. 三七及其种植土壤重金属及有害元素风险评估[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
SUN ZS. Risk assessment of heavy metals and harmful elements in *Panax notoginseng* and its cultivated soil [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020.

[4] 闫卉欣, 孔丹丹, 李歆悦, 等. 动物药僵蚕中重金属及有害元素的污染水平及其健康风险评估[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5051-057.
YAN HX, KONG DD, LI XY, *et al*. Pollution levels and health risk assessment of heavy metals and harmful elements in bombyx batryticatus (an animal-derived traditional Chinese medicine) [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(23): 5051–5057.

[5] 程志飞, 刘品祯, 吴迪. 部分市售药材重金属污染状况及健康风险评估[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 263–265.
CHENG ZF, LIU PZ, WU D. Pollution status and health risk assessment of heavy metals in some commercially available chinese medicinal materials [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(13): 263–265.

[6] 骆璐. 药用植物多农药残留重金属的大样本检测及综合风险评估[D]. 北京: 中国中医科学院, 2021.
LUO L. Large-sample detection and comprehensive risk assessment of multiple pesticide residues and heavy metals in medicinal plants [D]. Beijing: China Academy of Chinese Medical Sciences, 2021.

[7] 庞玉新, 赵致, 李立星. 黄精的化学成分及药理作用[J]. 山地农业生物学报, 2003(6): 547–550.
PANG YX, ZHAO Z, LI LX. Chemical composition and pharmacological effects of *Polygonatum sibiricum* [J]. Journal of Mountain Agriculture Biology, 2003(6): 547–550.

[8] 焦劼. 黄精种质资源研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
JIAO J. Research on germplasm resources of *Polygonatum sibiricum* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[9] 李莺, 赵兵, 陈克克, 等. 黄精的研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2012(1): 9–13.
LI Y, ZHAO B, CHEN KK, *et al*. Research progress of Huangjing [J]. Wild Plant Resources in China, 2012(1): 9–13.

[10] 尹素娟, 骆航, 孙兴力. 九蒸九制对黄精品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 302-307.
YIN SJ, LUO H, SUN XL. Influence of nine steaming and nine processing methods on the quality of *Polygonatum sibiricum* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 302-307.

[11] 傅圣斌, 钱建鸿, 陈乐意, 等. 黄精多糖的提取及其对小鼠免疫活性的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 68–72.
FU SB, QIAN JH, CHEN LY, *et al*. Extraction of *Polygonatum odoratum* polysaccharides and their effects on immune activity in mice [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2013, 13(1): 68–72.

[12] 何沛煜, 张军银, 赵永艳, 等. 黄精药用价值及保健食品应用研究进展[J]. 海峡药学, 2021, 33(12): 31–35.
HE PY, ZHANG JY, ZHAO YY, *et al*. Research progress on the medicinal value and health food application of *Polygonatum odoratum* [J]. Strait Pharmacy, 2021, 33(12): 31–35.

[13] LI SH, ZOU DS, LI LC, *et al*. Evolution of heavy metals during thermal treatment of manure: A critical review and outlooks [J]. Chemosphere, 2020, 247: 125962.

[14] 杨光, 郭兰萍, 周修腾, 等. 中药材规范化种植(GAP)几个关键问题商榷[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(7): 1173–1177.
YANG G, GUO LP, ZHOU XT, *et al*. Discussion on several key issues of good agricultural practice (GAP) for standardized cultivation of Chinese medicinal materials [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(7): 1173–1177.

[15] 赵连华, 杨银慧, 胡一晨, 等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199–1206.
ZHAO LH, YANG YH, HU YC, *et al*. Analysis of the current situation of heavy metal pollution in Chinese medicinal materials in China and study on countermeasures [J]. Chinese Herbal Medicines, 2014, 45(9): 1199–1206.

[16] 周利, 杨健, 詹志来, 等. 不同产地黄连中重金属的含量测定及不同用药方式下黄连重金属的风险评估[J]. 药学学报, 2018, 53(3): 432–438.
ZHOU L, YANG J, ZHAN ZL, *et al*. Determination of heavy metal contents in coptis chinensis from different producing areas and risk assessment of heavy metals in coptis chinensis under different medication methods [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2018, 53(3): 432–438.

[17] 胡利喆, 李鹏, 朱宏, 等. 黄芪中重金属含量分析及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 120–128.
HU LZ, LI P, ZHU H, *et al*. Analysis and risk assessment of heavy metal contents in *Astragalus membranaceus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 120–128.

[18] USEPA(United States Environmental Protection Agency) [Z]. Risk-based

[19] 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 XQ, WANG Q, CHEN Y. Determination of heavy metal contents in *Gardenia jasminoides* from different producing areas and health risk assessment[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2022, 37(2): 1041–1046.

[20] 李歆悦, 孔丹丹, 王蓉, 等. 小柴胡复方制剂中重金属残留污染分析及其健康风险评估[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5058–5064.
LI Y, KONG DD, WANG R, *et al*. Analysis of heavy metal residue pollution in Xiao Chaihu compound preparation and its health risk assessment [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(23): 5058–5064.

[21] EFSA. Scientific Opinion on lead in food [J]. EFSAJ, 2010, 8(4): 1570.

[22] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Volume I, Human Health Evaluation Manual (Part D) [R]. Washington, D.C.: U.S. EPA, 2001.

[23] International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts [R]. Lyon: IARC, 2012.

[24] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Twenty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. Geneva: WHO, 1982.

[25] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Thirty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. Geneva: WHO, 1989.

[26] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Summary report of the seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. Geneva: WHO, 2010.

[27] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. Geneva: WHO, 2011.

[28] 朱晓慧. 茶叶中氟、铝和重金属含量关键风险因子分析及风险评估[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
ZHU XH. Analysis of key risk factors and risk assessment of fluoride, aluminum and heavy metal contents in tea [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.

[29] 曾秋初, 李衡, 刘建存, 等. 中药粉碎前后重金属铬含量检测分析[J]. 中国药师, 2016, 19(3): 613–615.
ZENG QC, LI H, LIU JC, *et al*. Determination and analysis of chromium content in traditional Chinese medicine before and after pulverization [J]. China Pharmacist, 2016, 19(3): 613–615.

[30] 方成武, 刘晓龙, 周安. 安徽不同产地牡丹皮及其生长土壤农药残留与重金属含量检测[J]. 现代中药研究与实践, 2005, 19(6): 17.
FANG CW, LIU XL, ZHOU AN. Determination of pesticide residues and heavy metal contents in moutan cortex and its growing soil from different producing areas in Anhui Province [J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2005, 19(6): 17.

[31] YAN W, DAI BAOQIN, XIN SHIGANG. Physiological responses and absorption of heavy metals by sedum spectabile boreau under the stress of combined heavy metal pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1051–1056.

[32] 顾万红,张芳红,孟令强,等. 20 种甘肃地产药材中铅、砷、镉、铜的含量测定 [J]. 卫生职业教育, 2008, (17): 107-108.
GU WH, ZhANG FH, MENG LQ, et al. Determination of lead, arsenic, cadmium and copper contents in 20 kinds of medicinal materials produced in Gansu[J]. Health Vocational Education, 2008, 26(17):107-108.

[33] 顾兴平, 顾永祚, 胡明芬, 等. 中药川附子微量重金属元素的分析研究[J]. 四川环境, 2002, 21(3): 4.
GU XP, GU YZ, HU MF, *et al*. Analytical study on trace heavy metal elements in Sichuan aconite root (a traditional Chinese medicine) [J]. Sichuan Environment, 2002, 21(3): 4.

[34] 薛健. 中药外源有害污染物分析方法研究[D]. 北京: 中国协和医科大学中国医学科学院, 2006.
XUE J. Study on analytical methods for exogenous harmful pollutants in traditional Chinese medicines [D]. Beijing: Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, 2006.

(责任编辑: 蔡世佳　安香玉)