

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80841

龙牙百合不同器官重金属含量分布特征 及健康风险评估

李晓玲¹ 童巧珍^{1,2,3} 石雨荷¹ 侯超文¹ 刘泽湘¹ 龚秀娟¹

(1. 湖南中医药大学药学院, 湖南 长沙 410208; 2. 湘产大宗地道药材种质资源及规范化种植重点实验室, 湖南 长沙 410208; 3. 湖南省普通高等学校中药现代化研究重点实验室, 湖南 长沙 410208)

摘要: [目的] 探究龙牙百合不同器官无机元素分布特征, 并对其重金属进行健康风险评估。[方法] 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定不同产地龙牙百合鳞茎、茎、叶、花中铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As) 6种重金属元素的含量, 结合靶标危害系数法(THQ)和致癌风险(CR)进行健康风险评估。[结果] ICP-OES方法线性、检测限、精密度、重复性和稳定性试验结果均良好, 实际药材的加样回收率为98.25%~105.81%; 不同器官的龙牙百合无机元素差异显著, 其中鳞茎、茎、叶、花蕾这4个器官均存在不同程度Cr超标现象, 含量依次为茎>鳞茎>叶>花蕾, 且叶Cd含量超标。不同产地的龙牙百合样品均无健康风险, 对人体不会产生非致癌与致癌风险, 但其茎、叶的THQ的总和大于THQ标准值, 应长期关注龙牙百合茎、叶中这些有害元素对健康的影响。[结论] 研究建立的方法可以用于龙牙百合药材中Cu、Hg、Pb、Cd、Cr、As残留量的测定和风险评估。

关键词: 龙牙百合; 器官; 重金属; 分布特征; 健康风险评估

Characteristics of heavy metal content distribution in different organs of *Lilium brownii* and its health risk assessment

LI Xiaoling¹ TONG Qiaozhen^{1,2,3} SHI Yuhe¹ HOU Chaowen¹ LIU Zexiang¹ GONG Xiujuan¹

(1. Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Germplasm Resources and Standardized Cultivation of Bulk Genuine Medicinal Materials, Changsha, Hunan 410208, China; 3. Key Laboratory of Modernization Research of Traditional Chinese Medicine in Hunan General Higher Education Institution, Changsha, Hunan 410208, China)

Abstract: [Objective] To explore the distribution of inorganic elements in different organs of *Lilium brownii* and to assess the health risks associated with its heavy metals. [Methods] The content of six heavy metals-copper (Cu), mercury (Hg), lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), and arsenic (As)-in the bulbs, stems, leaves, and flowers of *Lilium brownii* from different regions is measured using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Health risk assessment is conducted using the Target Hazard Quotient (THQ) and Carcinogenic Risk (CR) methods. [Results] The ICP-OES method shows good linearity, detection limits, precision, repeatability, and stability, with the recovery rate for the actual samples ranging from 98.25% to 105.81%. Significant differences in inorganic elements are found across the different organs of *Lilium brownii*. Notably, the bulbs, stems, leaves, and flowers exhibit varying degrees of Cr content exceeding the standard limit, with the order of content being stems > bulbs > leaves > flowers. Additionally, the Cd content in the leaves is above the standard. No health risks are found in the *Lilium brownii* samples from different regions, with no non-carcinogenic or carcinogenic risks to

基金项目: 国家中药材产业技术体系食用百合龙山综合试验站资助项目(编号: CARS-21); 湖南省科技厅创新平台与人才计划(编号: 2023NK4141); 湖南省教育厅大学生创新项目(编号 202210541055)

通信作者: 童巧珍(1971—), 女, 湖南中医药大学教授, 博士。E-mail: 410849649@qq.com

收稿日期: 2024-08-21 **改回日期:** 2025-03-14

引用格式: 李晓玲, 童巧珍, 石雨荷, 等. 龙牙百合不同器官重金属含量分布特征及健康风险评估[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 56-64.

Citation: LI Xiaoling, TONG Qiaozhen, SHI Yuhe, et al. Characteristics of heavy metal content distribution in different organs of *Lilium brownii* and its health risk assessment[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 56-64.

human health. However, the sum of the THQ values for the stems and leaves exceeds the THQ standard, suggesting the need for long-term attention to the health impact of harmful elements in these organs. [Conclusion] The methods established in this study can be used for the determination and risk assessment of Cu, Hg, Pb, Cd, Cr, and As residues in *Lilium brownii* medicinal materials.

Keywords: *Lilium brownii*; organ; heavy metal; distribution characteristic; health risk assessment

龙牙百合为百合科植物百合 (*Lilium brownii* var. *viridulum* Baker) 的干燥鳞茎, 是中国人工栽培的三大食用百合之一, 具有重要的食用、药用和观赏价值^[1]。其鳞茎由二三十瓣重叠在一起, 鳞片肥大呈披针形, 因形似龙牙而得名^[2], 因其富含生物碱、蛋白质、淀粉、脂肪以及多种人体必需的维生素和微量元素, 展现出卓越的抗氧化、抗抑郁、降血糖和降血脂等多种生理活性^[3-4]。

随着工业化和现代化农业的快速发展, 人类活动对自然环境的影响日益显著, 其中一个重要的问题就是重金属元素的释放与积累^[5]。现代化农业中, 农药、化肥以及污水灌溉等农业活动是重金属污染的重要来源, 同时, 一些地区使用未经处理的工业废水进行灌溉, 进一步加剧了水体和土壤的重金属污染^[6-8]。近年来, 由于中药材重金属累积所致的人体健康风险为其推广、使用带来了一定的阻碍^[9-10], 人体若长期暴露于重金属环境中, 可能遭受身体、肌肉及神经系统的严重损害, 进而增加罹患多发性硬化症、帕金森病、阿尔茨海默病及肌肉萎缩症等严重疾病的风险^[11-13]。

在龙牙百合的种植过程中, 需定期施加化肥农药、引水灌溉等, 这些重金属可能会残留在百合中, 导致百合重金属含量超标^[14]。其中, 土壤镉是百合潜在生态风险较大的元素。李瑞琴等^[15]对百合产区食用百合及其土壤中重金属镉、铅、汞的潜在生态与健康风险进行分析后, 发现镉是百合研究区域生态环境中主要的潜在影响因素。然而对于百合药用部位鳞茎重金属含量与其他部位重金属含量之间的关系, 及其对人体的健康风险仍然缺乏有效研究。

研究拟探究龙牙百合不同器官无机元素分布特征, 并对其进行健康风险评估, 旨在为百合优质安全生产提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验样品

龙牙百合各器官干燥样品, 采收于2023年5—8月, 材料共60份(见表1)。所有样品均经湖南中医药大学周日宝教授鉴定为百合科植物百合 (*Lilium brownii* var. *viridulum* Baker)。将鳞茎、茎、叶及花瓣样品清洗干净, 鳞茎根据鳞片大小于沸腾的蒸锅中蒸3~5 min, 将所有样品放入烘箱50℃恒温烘干, 粉碎后过80目筛, 4℃冷藏备用。

1.1.2 仪器与设备

电感耦合等离子体发射光谱仪: ICAP PRO.X 型, 赛默飞世尔科技公司;

封闭电炉: FL-1/2型, 北京市永光明医疗仪器有限公司;
分析天平: ME204E/02型, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

高速中药粉碎机: YF500型, 瑞安市永历制药机械有限公司。

1.1.3 试剂及标准溶液

硝酸: 优级纯, 湖南汇虹试剂有限公司;

高氯酸: 分析纯, 湖南汇虹试剂有限公司;

铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)元素标准溶液(1 000 μg/mL): 分析纯, 国家有色金属及电子材料分析测试中心。

1.2 方 法

1.2.1 供试品溶液的制备 采用湿式消解法消解样品, 准确称取1.0 g样品置于100 mL锥形瓶中, 随后加入8 mL浓硝酸(优级纯)和2 mL高氯酸, 充分混合后, 在瓶口放置一小漏斗以防挥发物逸出, 浸泡过夜。次日, 将锥形瓶置于电热板上加热消解, 保持微沸状态, 直至消解液挥发至大约1 mL时停止加热。待冷却后, 检查是否有明显浮渣残留, 若有, 再次加入浓硝酸并继续加热搅拌, 直至浮渣完全消失。消解完成后, 将消化液冷却并转移至50 mL容量瓶中, 用2%硝酸溶液稀释至刻度, 摇匀, 得到待测溶液。每个样品平行测定3次, 同法同时制备试剂空白溶液^[16]。

1.2.2 内标溶液的制备 精密量取适量混合内标标准溶液, 用2%硝酸溶液稀释至质量浓度为1 μg/L。

1.2.3 标准样品的配制 精确量取多元素标准液(Cu、Hg、Pb、Cd、Cr、As), 加入2%硝酸逐级稀释制成金属元素质量浓度为5, 50, 100, 200, 500 μg/L, 临用配制。

1.2.4 ICP-OES 仪检测条件 功率1 150 W、等离子气流量12.5 L/min、雾化气流量0.8 L/min、分析泵速10 r/min、辅助气流量0.5 L/min; 元素观测谱线: Cu 327.306 nm、Pb 220.353 nm、Hg 194.227 nm、Cd 228.802 nm、Cr 283.563 nm、As 189.042 nm。

2 结果与分析

2.1 方法学考察

2.1.1 线性关系考察及检出限 以2%硝酸为空白, 采用ICP-OES测定6种重金属标准混合溶液, 以质量浓度为横坐标, 信号值为纵坐标, 绘制标准曲线, 详见表2。同时参照“1.2.1”项下样品制备方法, 除不加供试品外, 其他操作程序同供试品溶液的制备法, 制备空白消化液, 之后计算检出限。

表 1 龙牙百合不同器官样品情况

Table 1 Different organs samples of *Lilium brownii*

编号	来源地	器官	编号	来源地	器官
LJ1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	鳞茎	HL1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	花蕾
LJ2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	鳞茎	HL2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	花蕾
LJ3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	鳞茎	HL3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	花蕾
LJ4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	鳞茎	HL4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	花蕾
LJ5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	鳞茎	HL5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	花蕾
LJ6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	鳞茎	HL6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	花蕾
LJ7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	鳞茎	HL7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	花蕾
LJ8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	鳞茎	HL8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	花蕾
LJ9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	鳞茎	HL9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	花蕾
LJ10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	鳞茎	HL10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	花蕾
J1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	茎	SH1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	始花
J2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	茎	SH2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	始花
J3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	茎	SH3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	始花
J4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	茎	SH4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	始花
J5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	茎	SH5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	始花
J6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	茎	SH6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	始花
J7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	茎	SH7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	始花
J8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	茎	SH8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	始花
J9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	茎	SH9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	始花
J10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	茎	SH10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	始花
Y1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	叶	SSH1	湖南省邵阳市隆回县北山镇岩石村	盛花
Y2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	叶	SSH2	湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇毛坪村	盛花
Y3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	叶	SSH3	湖南省邵阳市隆回县雨山镇小水村	盛花
Y4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	叶	SSH4	湖南省邵阳市隆回县北山镇莫家村	盛花
Y5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	叶	SSH5	湖南省永州市东安县水岭乡下丰村	盛花
Y6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	叶	SSH6	湖南省岳阳市平江县南江镇百合村	盛花
Y7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	叶	SSH7	湖南省邵阳市隆回县西洋江镇石塘村	盛花
Y8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	叶	SSH8	湖南省岳阳市平江县南江镇罗洞村	盛花
Y9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	叶	SSH9	湖南省岳阳市平江县安定镇白坪村(野生移栽)	盛花
Y10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	叶	SSH10	湖南省常德市鼎城区示范场西洋陂村	盛花

2.1.2 精密度的试验 精密吸取“1.2.3”项下制备的对照品溶液适量,按照“1.2.4”项进样条件连续进样 6 次,测得 6 种元素含量相对标准偏差(RSD)在 0.23%~0.98%,表明仪器精密良好。

表 2 线性关系考察表

Table 2 Linear relationship survey table

成分	线性方程	R ²	线性范围/ (μg·L ⁻¹)	检出限/ (μg·L ⁻¹)
Cu	y=1.002 8x-0.983 1	0.999 8	0~500	0.001
Hg	y=1.009 6x-1.094 9	0.999 6	0~500	0.001
Pb	y=1.004 8x-1.713 6	0.999 8	0~500	0.001
Cd	y=0.991 1x+0.052 5	0.999 8	0~500	0.001
Cr	y=1.002 3x-0.796 7	1.000 0	0~500	0.001
As	y=x+0.021 5	0.999 9	0~500	0.001

2.1.3 重复性试验 在“1.2.1”项的样品制备方法下平行制备 6 份样品溶液,测试结果显示 RSD 在 2.04%~2.89%,表明该方法具有良好的稳定性和良好的重复性。

2.1.4 加样回收试验 取鳞茎样品 S1,精密称取 0.5 g,添加对应的标准溶液,按“1.2.1”项下方法制备供试品并平行操作 6 次,进行加样回收试验。结果(表 3)显示,砷、铅、铜、铬、镉、汞的加样回收率为 98.25%~105.81%,RSD 在 1.49%~2.88%,表明该方法准确性良好。

2.2 龙牙百合中重金属含量分析

按“1.2.1”项下方法制备供试品溶液,每批样品平行测定 3 次,计算样品中重金属元素的含量,具体结果见表 4。参照 2020 版《中华人民共和国药典》规定的中药重金属及有害元素的限度指导值对样品进行判定(As≤2 mg/kg、Pb≤5 mg/kg、Cu≤20 mg/kg、Cd≤1 mg/kg、Hg≤

表3 各元素加样回收率试验结果

Table 3 Experimental results of recovery rate for each element

对照品	药材中对照 品含量/mg	加入量/ mg	测得总 量/mg	回收 率/%	平均回收 率/%	RSD/ %	对照品	药材中对照 品含量/mg	加入量/ mg	测得总 量/mg	回收 率/%	平均回收 率/%	RSD/ %	
As	1.202 9	1.188 6	2.428 8	103.14	105.59	1.37	Cr	21.936 6	26.265 5	48.382 0	100.68	100.28	2.16	
	1.227 3	1.188 6	2.473 8	104.87				21.723 5	26.265 5	47.628 5	98.63			
	1.224 7	1.188 6	2.488 9	106.36				22.368 2	26.265 5	48.709 1	100.29			
	1.224 6	1.188 6	2.483 3	105.90				23.165 5	26.265 5	48.920 0	98.05			
	1.238 7	1.188 6	2.515 0	107.38				22.035 6	26.265 5	49.408 9	104.22			
	1.231 8	1.188 6	2.490 8	105.93				22.236 5	26.265 5	48.458 8	99.84			
Pb	3.638 4	3.670 2	7.367 8	101.61	100.52	1.49	Cd	4.356 7	4.301 2	8.892 5	105.45	104.14	1.80	
	3.637 2	3.670 2	7.277 3	99.18				4.524 8	4.301 2	9.040 6	104.99			
	3.598 7	3.670 2	7.376 9	102.94				4.545 6	4.301 2	9.053 5	104.81			
	3.612 7	3.670 2	7.259 1	99.35				4.472 3	4.301 2	8.984 0	104.89			
	3.624 5	3.670 2	7.313 8	100.52				4.464 5	4.301 2	8.782 6	100.39			
	3.627 4	3.670 2	7.280 2	99.53				4.548 5	4.301 2	9.033 7	104.28			
Cu	39.359 8	41.861 5	80.957 8	99.37	102.75	1.83	Hg	1.433 2	1.443 3	2.903 5	101.87	98.25	2.88	
	38.365 5	41.861 5	81.877 4	103.94				1.415 6	1.443 3	2.789 3	95.17			
	38.352 1	41.861 5	81.789 2	103.76				1.426 5	1.443 3	2.833 2	97.47			
	40.358 1	41.861 5	84.151 1	104.61				1.409 9	1.443 3	2.828 2	98.27			
	41.035 9	41.861 5	83.983 8	102.60				1.411 2	1.443 3	2.872 9	101.27			
	41.003 8	41.861 5	83.804 0	102.24				1.423 6	1.443 3	2.801 5	95.47			

0.2 mg/kg), 而铬含量根据加拿大《食品药品条例》中规定药食两用植物的重金属最大残留限度指导值对样品进行判定($Cr \leq 2 \text{ mg/kg}$)。

对比6种元素的箱形图(图1)发现,龙牙百合不同器官中Pb、As、Cu、Hg限量均在标准限值范围内,整体表现为地下部分中的含量大于地上部分的,但其叶存在多数批次的Cd超标的现象。吴家萌等^[17]通过对龙牙百合不同器官中镉含量进行测定,发现龙牙百合各器官Cd含量为叶>地上茎>地下茎>鳞茎,龙牙百合将Cd截留于茎部和叶部,以减少Cd在其他器官的累积,使得鳞茎中Cd含量最低;雷星宇等^[18]分析了卷丹百合不同器官中Cd的富集系数,结果表明,同一Cd浓度下,各器官富集系数排序为茎>叶>花>鳞茎,地上茎、叶富集系数显著大于地下部分的。推测地上部分中的Cd主要来源于地上部须根吸收的表层土,再通过木质部输送到其他器官,形成Cd在地上部分中的含量高于鳞茎的分布特征^[19]。

根据加拿大《食品药品条例》中规定药食两用植物的重金属最大残留限度指导值,龙牙百合鳞茎、茎、叶、花蕾中Cr平均值分别超过该标准限量的1.26倍、1.41倍、1.22倍、1.03倍,可能是由于百合受病虫害威胁较为严重,在种植期间使用了含Cd、Cr等重金属的农药。有研究^[20-21]表明,植物体不同部位对重金属的富集能力不同。百合鳞茎与土壤接触并直接参与Cr的吸收,而花和叶远

离土壤且生长周期较短,因此富集的Cr含量相对较低。

2.3 不同目标重金属间的相关性分析

为了表征龙牙百合中不同重金属元素间的相关性,应用Origin 2020数据分析工具对测定数据进行Pearson相关性分析,结果见图2。由图2可知,有7对重金属元素呈显著正相关($P \leq 0.01$ 或 $P \leq 0.05$),2对元素As-Pb、As-Cd呈极显著负相关($P \leq 0.01$),表明植物体内不同金属元素的积累常相互促进,共同吸收,显示出一定的同质性特征。

2.4 健康风险评估

2.4.1 耐受量评估 每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)按照文献[22]的方法计算。根据2020版《中国药典》推荐百合用药量为6~12 g,此处百合成人摄入量取12 g,儿童摄入量取6 g。作为每日估计摄入重金属量,其与每日暂定可耐受摄入量(provisional tolerable daily intake, PTDI)进行比较分析,得到百合可能导致的健康风险水平。世界卫生组织所属食品添加剂委员会(JECFA)建议AS、Pb、Cu、Cr、Cd、Hg的PTDI分别为0.002 14, 0.003 50, 0.500 00, 0.003 00, 0.000 66, 0.000 57 mg/(kg·d)^[23]。当EDI<PTDI时,认为人体负荷重金属的量无明显健康影响。

将60批龙牙百合样品的重金属含量平均值代入公式计算得到EDI,见表5。由表5可知,百合鳞茎、茎、叶、花

表 4 龙牙百合中 6 种元素含量测定结果

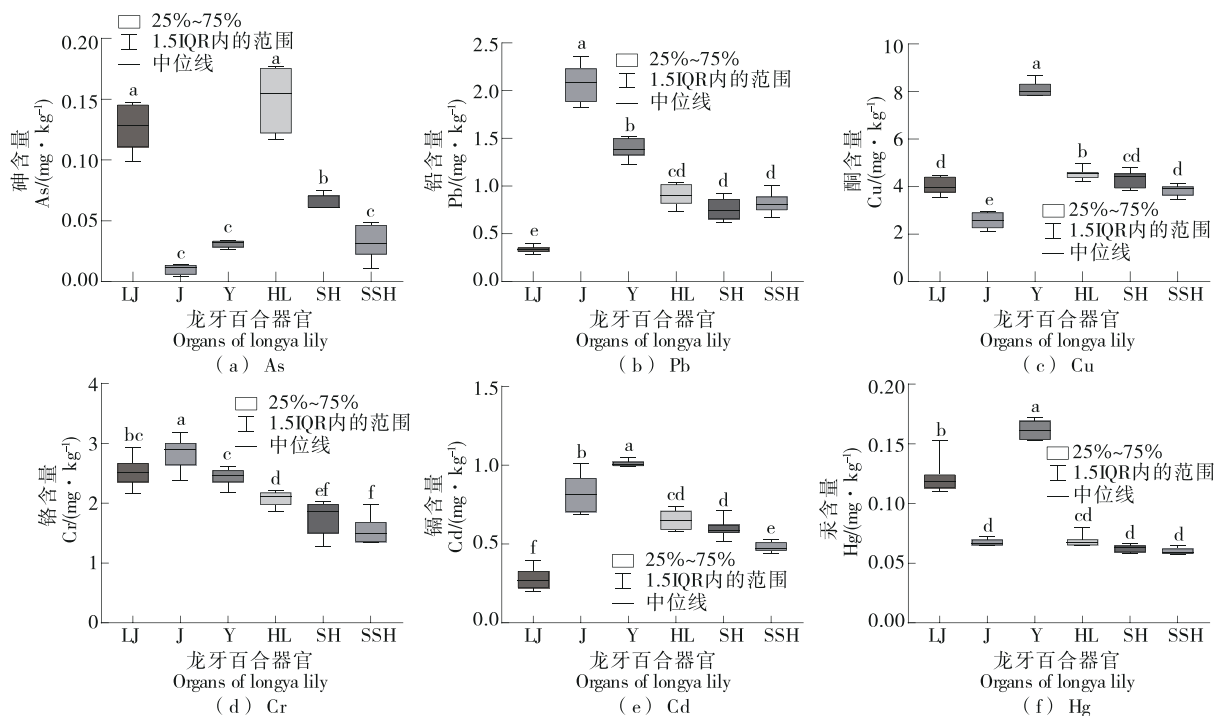
Table 4 Measured content of 6 elements in *Lilium brownii*

器官	样品 编号	As	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	器官	样品 编号	As	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg
鳞茎	LJ1	—	0.367 1	3.953 8	2.513 7	0.395 1	0.152 6	花蕾	HL1	0.117 1	0.921 0	4.195 3	1.980 4	0.727 2	0.068 9
	LJ2	0.128 6	0.344 5	4.083 1	2.385 5	0.256 2	0.116 2		HL2	—	0.873 2	4.604 4	2.193 7	0.740 5	0.070 1
	LJ3	—	0.318 2	3.798 0	2.757 6	0.375 0	0.123 7		HL3	0.173 1	0.786 7	4.533 8	2.221 0	0.641 0	0.080 3
	LJ4	—	0.284 2	3.931 0	2.160 9	0.264 4	0.113 3		HL4	—	0.859 5	4.618 7	1.917 4	0.577 2	0.064 9
	LJ5	0.098 6	0.349 5	4.474 4	2.936 4	0.316 0	0.111 8		HL5	0.176 5	0.827 5	4.543 5	2.118 5	0.656 0	0.070 1
	LJ6	—	0.319 8	4.452 5	2.234 1	0.274 7	0.121 6		HL6	—	0.733 5	4.431 3	1.987 6	0.707 2	0.064 4
	LJ7	0.122 6	0.294 1	4.399 4	2.468 0	0.201 5	0.114 0		HL7	—	1.017 5	4.974 5	1.858 4	0.689 8	0.070 0
	LJ8	0.143 6	0.353 9	3.616 0	2.596 8	0.222 0	0.110 0		HL8	0.136 2	1.020 6	4.236 7	2.119 6	0.592 7	0.065 7
	LJ9	0.147 4	0.395 0	3.561 4	2.641 3	0.292 2	0.121 1		HL9	—	1.014 8	4.399 0	2.107 7	0.578 8	0.065 3
	LJ10	—	0.331 5	3.807 0	2.507 5	0.215 4	0.127 1		HL10	—	1.032 6	4.546 8	2.180 9	0.642 3	0.064 4
平均值	0.128 2	0.335 8	4.007 7	2.520 2	0.281 3	0.121 1	平均值	0.150 7	0.908 7	4.508 4	2.068 5	0.655 3	0.068 4		
茎	J1	—	1.860 7	2.722 8	2.853 2	0.702 9	0.066 5	始花	SH1	0.067 0	0.616 8	4.795 3	1.977 6	0.579 6	0.066 3
	J2	0.004 3	2.107 2	2.918 2	2.959 1	0.701 5	0.064 9		SH2	—	0.764 4	3.881 1	1.802 3	0.618 6	0.065 8
	J3	0.010 5	1.887 4	2.192 3	2.678 9	0.779 0	0.069 5		SH3	0.060 7	0.702 6	4.438 9	2.032 9	0.598 1	0.063 9
	J4	—	2.067 6	2.938 6	2.665 6	0.896 0	0.071 6		SH4	—	0.650 7	4.780 2	1.286 8	0.568 9	0.059 1
	J5	—	1.826 1	2.909 8	3.022 6	0.845 5	0.064 6		SH5	—	0.656 4	4.480 6	1.930 5	0.630 6	0.059 2
	J6	0.013 0	2.189 6	2.125 2	2.381 9	0.737 1	0.064 8		SH6	0.060 6	0.898 6	3.822 4	1.784 5	0.575 1	0.058 3
	J7	—	2.303 5	2.710 2	2.929 6	0.689 3	0.065 5		SH7	—	0.730 9	4.374 1	1.955 4	0.712 0	0.064 7
	J8	—	2.356 3	2.482 5	2.535 5	0.906 9	0.072 1		SH8	0.074 8	0.782 0	3.942 2	2.014 9	0.513 7	0.058 5
	J9	—	1.927 4	2.263 6	3.007 1	1.012 2	0.066 9		SH9	0.066 9	0.920 0	4.469 2	1.404 8	0.571 2	0.063 3
	J10	0.014 0	2.209 2	2.290 2	3.182 2	0.954 4	0.066 3		SH10	—	0.855 4	4.274 7	1.522 5	0.616 5	0.064 7
平均值	0.010 5	2.073 5	2.555 3	2.821 6	0.822 5	0.067 3	平均值	0.066 0	0.757 8	4.325 9	1.771 2	0.598 4	0.062 4		
叶	Y1	0.032 4	1.502 5	7.813 3	2.450 6	1.047 5	0.171 7	盛花	SSH1	0.048 8	0.885 9	4.011 4	1.448 7	0.528 6	0.065 0
	Y2	—	1.386 4	7.818 8	2.465 1	0.993 3	0.153 0		SSH2	—	0.773 1	4.139 9	1.678 3	0.467 7	0.058 3
	Y3	0.034 0	1.368 1	8.048 9	2.617 9	0.990 8	0.164 5		SSH3	0.045 7	0.713 2	3.932 1	1.532 5	0.476 2	0.057 4
	Y4	—	1.221 3	7.824 5	2.228 4	1.008 8	0.158 5		SSH4	—	0.906 0	3.682 8	1.721 7	0.445 4	0.062 6
	Y5	—	1.452 0	7.946 5	2.185 2	1.029 8	0.169 0		SSH5	0.035 6	1.004 5	3.449 8	1.349 9	0.512 7	0.062 3
	Y6	—	1.517 3	7.857 2	2.570 6	1.000 2	0.159 5		SSH6	0.010 5	0.757 5	4.010 3	1.460 0	0.441 9	0.058 3
	Y7	0.032 4	1.500 6	8.551 5	2.459 9	1.003 7	0.153 3		SSH7	—	0.868 5	3.917 1	1.646 0	0.473 3	0.057 7
	Y8	0.026 7	1.288 6	8.035 6	2.388 4	1.021 1	0.162 3		SSH8	—	0.816 5	3.494 4	1.351 2	0.461 1	0.062 5
	Y9	—	1.382 5	8.659 1	2.551 2	0.997 6	0.169 7		SSH9	0.027 4	0.670 2	3.663 0	1.336 9	0.468 5	0.059 4
	Y10	—	1.334 3	8.254 3	2.462 8	0.990 6	0.152 9		SSH10	0.026 3	0.791 3	3.923 3	1.974 3	0.512 8	0.057 2
平均值	0.031 4	1.395 4	8.081 0	2.438 0	1.008 3	0.161 4	平均值	0.032 4	0.818 7	3.822 4	1.550 0	0.478 8	0.060 1		

蕾、始花、盛花中各重金属项下 EDI 均小于 PTDI, 可认为人体负荷重金属的量无明显健康影响。

2.4.2 非致癌性风险与终身致癌性风险评估 为了进一步对百合中重金属及有害元素的健康风险进行评估, 利用靶标危害系数法 (target hazard quotients, THQ) 和终身致癌性风险评估法 (carcinogenic risk, CR) 进行评估, THQ 和 CR 均按照文献[24]的方法计算。其中, 每年暴露于毒物的天数设定为 30 d; 暴露于毒物的年数设定为 30 年; 平

均接触非致癌毒物的时间设定为平均人均寿命, 即 70 年; 参照 USEPA 提供的参考剂量: As、Pb、Cu、Cr、Cd、Hg 分别为 0.003, 0.004, 0.040, 1.500, 0.001, 0.003 mg/(kg·d); 致癌斜率因子: As、Pb、Cd、Cr 分别为 1.500 0, 0.008 5, 6.100 0, 0.500 0 mg/(kg·d)。中草药重金属限量国际标准指出当 THQ < 1 时, 被认为人体负荷重金属及有害元素量未对人体健康造成明显的影响^[25]。然而, ISO 组织建议药物 THQ 的计算应考虑其在食物中的占比, 即标准 THQ, 为每



小写字母不同表示同一重金属元素不同器官内差异显著($P < 0.05$)

图1 龙牙百合不同器官中重金属及有害元素的污染水平

Figure 1 Pollution levels of heavy metals and harmful elements in different organs of *Lilium brownii*

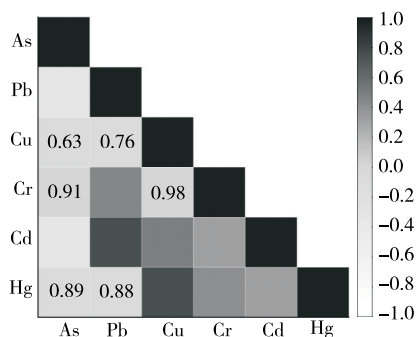


图2 无机元素相关性分析

Figure 2 Correlation analysis of inorganic elements

日摄入量与每日进食量的比值。其中,成人的每日进食量为 1 500 g,儿童为 800 g^[26]。因此,当 THQ 分别低于 0.008 0 和 0.007 5 时,可认为其重金属含量对成人和儿童的健康无明显危害。

百合的鳞茎、茎、叶、花中检测的 6 种重金属元素的 THQ 均低于 1,表明这些部位的重金属含量未达到显著的非致癌健康风险水平,见表 6。通过分析 6 种重金属元素 THQ 的总和可以发现,除茎和叶的 THQ 总和超出标准值外,其他部位的 THQ 总和均低于相应的标准值(见图 3)。因此,有必要对百合进行持续监测,并重点关注龙牙百合茎和叶中这些重金属元素对健康的潜在影响。

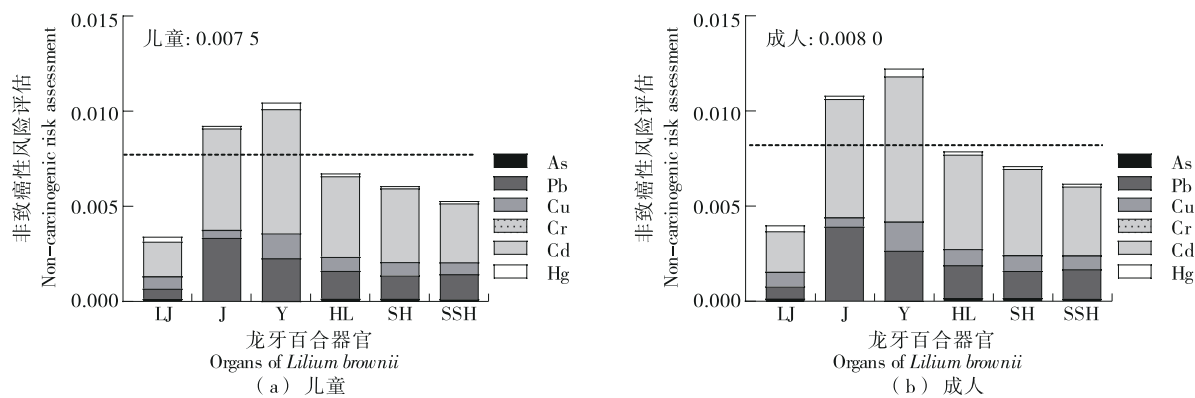


图3 成人与儿童长期服用龙牙百合摄入重金属的 THQ

Figure 3 THQ of heavy metal intake by adults and children after long-term consumption of *Lilium brownii*

表 5 龙牙百合中 6 种重金属元素 EDI 评估结果

Table 5 EDI evaluation results of 6 heavy metal elements in *Lilium brownii*

元素	PTDI	人群	鳞茎	茎	叶	花蕾	始花	盛花
As	0.002 14	成人	0.000 014	0.000 001	0.000 003	0.000 015	0.000 015	0.000 012
		儿童	0.000 012	0.000 001	0.000 002	0.000 013	0.000 013	0.000 011
Pb	0.003 50	成人	0.000 072	0.000 445	0.000 300	0.000 195	0.000 163	0.000 176
		儿童	0.000 062	0.000 380	0.000 256	0.000 167	0.000 139	0.000 150
Cu	0.500 00	成人	0.000 860	0.000 549	0.001 735	0.000 968	0.000 929	0.000 821
		儿童	0.000 735	0.000 469	0.001 483	0.000 827	0.000 794	0.000 701
Cr	0.003 00	成人	0.000 541	0.000 606	0.000 523	0.000 444	0.000 380	0.000 333
		儿童	0.000 462	0.000 518	0.000 447	0.000 380	0.000 325	0.000 284
Cd	0.000 66	成人	0.000 060	0.000 177	0.000 216	0.000 141	0.000 128	0.000 103
		儿童	0.000 052	0.000 151	0.000 185	0.000 120	0.000 110	0.000 088
Hg	0.000 57	成人	0.000 026	0.000 014	0.000 035	0.000 015	0.000 013	0.000 013
		儿童	0.000 022	0.000 012	0.000 030	0.000 013	0.000 011	0.000 011

表 6 龙牙百合中 6 种重金属元素非致癌性风险评估结果

Table 6 Non-carcinogenic risk assessment results of 6 heavy metal elements in *Lilium brownii*

元素	人群	鳞茎	茎	叶	花蕾	始花	盛花
As	成人	0.000 162	0.000 011	0.000 032	0.000 182	0.000 179	0.000 147
	儿童	0.000 138	0.000 009	0.000 027	0.000 155	0.000 153	0.000 125
Pb	成人	0.000 635	0.003 920	0.002 638	0.001 718	0.001 433	0.001 548
	儿童	0.000 543	0.003 350	0.002 255	0.001 468	0.001 224	0.001 323
Cu	成人	0.000 758	0.000 483	0.001 528	0.000 852	0.000 818	0.000 723
	儿童	0.000 648	0.000 413	0.001 306	0.000 728	0.000 699	0.000 618
Cr	成人	0.000 013	0.000 014	0.000 012	0.000 010	0.000 009	0.000 008
	儿童	0.000 011	0.000 012	0.000 011	0.000 009	0.000 008	0.000 007
Cd	成人	0.002 127	0.006 219	0.007 625	0.004 955	0.004 525	0.003 621
	儿童	0.001 818	0.005 316	0.006 517	0.004 235	0.003 868	0.003 095
Hg	成人	0.000 305	0.000 170	0.000 407	0.000 172	0.000 157	0.000 151
	儿童	0.000 261	0.000 145	0.000 348	0.000 147	0.000 134	0.000 129

基于公式计算 As、Pb、Cd、Cr 的 CR 值,USEPA 规定癌症风险阈值为 1×10^{-6} ,当 CR 值 $> 10^{-4}$ 时的风险为不可接受, $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 表示存在可接受的低水平致癌风险,评估

结果见表 7,所有元素的 CR 值远小于 10^{-6} ,说明无论对成人还是儿童,As、Pb、Cd 和 Cr 造成的致癌风险都可以忽略不计,不会对人体健康构成致癌威胁。

表 7 龙牙百合中重金属元素致癌性风险评估结果

Table 7 Carcinogenicity risk assessment results of heavy metal elements in *Lilium brownii* (n=10)

元素	人群	鳞茎	茎	叶	花蕾	始花	盛花
As	成人	7.27×10^{-10}	4.70×10^{-11}	1.42×10^{-10}	8.18×10^{-10}	8.07×10^{-10}	6.60×10^{-10}
	儿童	6.21×10^{-10}	4.00×10^{-11}	1.22×10^{-10}	7.00×10^{-10}	6.90×10^{-10}	5.64×10^{-10}
Pb	成人	2.20×10^{-11}	1.33×10^{-11}	9.00×10^{-11}	5.80×10^{-11}	4.90×10^{-11}	5.30×10^{-11}
	儿童	1.80×10^{-11}	1.14×10^{-10}	7.70×10^{-11}	5.00×10^{-11}	4.20×10^{-11}	4.50×10^{-11}
Cd	成人	1.30×10^{-7}	3.79×10^{-7}	4.65×10^{-7}	3.02×10^{-7}	2.76×10^{-7}	2.20×10^{-7}
	儿童	1.11×10^{-7}	3.24×10^{-7}	3.98×10^{-7}	2.58×10^{-7}	2.36×10^{-7}	1.89×10^{-7}
Cr	成人	9.53×10^{-8}	1.07×10^{-7}	9.22×10^{-8}	7.82×10^{-8}	6.70×10^{-8}	5.86×10^{-8}
	儿童	8.14×10^{-8}	9.12×10^{-8}	7.88×10^{-8}	6.69×10^{-8}	5.72×10^{-8}	5.01×10^{-8}

3 结论

采用电感耦合等离子体发射光谱法对龙牙百合中6种重金属元素进行了含量测定,综合分析了龙牙百合中重金属元素组成的特征要素。测定结果显示龙牙百合不同器官各元素在含量上存在明显的差异,表明龙牙百合地上部分和地下部分对重金属元素的富集和积累能力呈现出一定的差异性,这种差异可能是由于外观形态、外界环境等共同作用导致的。60批龙牙百合不同器官中铅、砷、铜、汞的含量均低于限量指导值,其茎和花中汞、砷、铬含量普遍低于鳞茎,但龙牙百合存在少批次铬、镉超标现象。尽管龙牙百合鳞茎、茎、叶存在不同程度重金属超标,但均无健康风险,对人体不会产生非致癌与致癌风险。

为了进一步完善对龙牙百合药材的质量控制,应积极推行在生态环境良好的地区建立生产基地,加大对产地土壤环境重金属的监测力度^[27-28],对土壤—龙牙百合系统微环境及重金属的不同赋存形态对重金属的富集转移影响效应进一步探究,以期全面地评价龙牙百合中重金属及有害元素的污染状况。

参考文献

- [1] 杨林滢, 陈森, 李庠, 等. 龙牙百合鳞茎生长点石蜡切片技术改良研究[J]. 湖南农业科学, 2024(6): 10-13, 20.
YANG L H, CHEN M, LI Y, et al. Improvement of paraffin sectioning conditions for the growing point of *Lilium brownii* var. *viridulum* baker bulb[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024 (6): 10-13, 20.
- [2] 陈海霞, 王登辉, 王茯苓, 等. 龙牙百合组织培养技术体系的优化[J]. 天津农业科学, 2021, 27(12): 6-12.
CHEN H X, WANG D H, WANG F L, et al. Optimization of tissue culture technology system of *Lilium brownii* var. *viridulum*[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2021, 27(12): 6-12.
- [3] 孙佳宁, 连希希, 孙伶俐, 等. 百合主要成分及药理作用研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(7): 45-50.
SUN J N, LIAN X X, SUN L L, et al. Research progress on main compositions and pharmacological actions of lily[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(7): 45-50.
- [4] 何丹, 张海潮, 李世慧, 等. 百合化学成分、药理作用及质量标志物的预测分析[J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(12): 205-212, 303.
HE D, ZHANG H C, LI S H, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of Baihe (*Lilium bulbosum*) and predictive analysis on quality markers[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2022, 40(12): 205-212, 303.
- [5] 储昭霞, 王兴明, 涂俊芳, 等. 重金属(Cd、Cu、Zn和Pb)在淮南塌陷塘鲫鱼体内的分布特征及健康风险[J]. 环境化学, 2014, 33(9): 1 433-1 438.

- CHU Z X, WANG X M, TU J F, et al. Distribution and health risk of heavy metals (Cd, Cu, Zn and Pb) in Crucian carp (*Carassius auratus* Gibelio) collected from subsidence pools in Huainan coal field[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(9): 1 433-1 438.
- [6] 贾玉玉, 孙哲, 马乙洮, 等. 湘江采矿污染区流段贝类重金属含量与健康风险评估[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2023, 36(3): 346-353.
JIA Y Y, SUN Z, MA Y T, et al. Heavy metal concentration and health risk assessment of shellfish in mine-impacted section of Xiangjiang river[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2023, 36(3): 346-353.
- [7] 何建国, 王新富, 马荣, 等. 皖北煤矿区农田土壤—小麦中重金属分布特征及健康风险评估[J]. 中国煤炭, 2021, 47(4): 81-88.
HE J G, WANG X F, MA R, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in farmland soil and wheat in coal mining area of Northern Anhui[J]. China Coal, 2021, 47(4): 81-88.
- [8] 刘洋洋, 尹奇峰, 倪圣军, 等. 垃圾填埋场渗滤液泄漏区域土壤重金属空间分布特征及健康风险评估[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(6): 1 021-1 029.
LIU Y Y, YI Q F, NI S J, et al. Spatial distribution characteristics and health risk assessment of soil heavy metals in the leachate leakage area of landfill[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(6): 1 021-1 029.
- [9] 周德来, 马春旭, 姚晓玲, 等. 植物类中药中重金属及有害元素来源及危害的研究进展[J]. 华西药学杂志, 2023, 38(5): 593-598.
ZHOU D L, MA C X, YAO X L, et al. Research progress on the source and harm of heavy metals and harmful elements in plant-based traditional Chinese medicine[J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2023, 38(5): 593-598.
- [10] 于冰冰. 云南文山三七种植区土壤和三七中砷的分布特征及其健康风险[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 8-9.
YU B B. Arsenic distribution of soil and *Panax notoginseng* in Wenshan County, Yunnan Province and its health risk[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 8-9.
- [11] 王洋, 刘建祥, 朱飞奇. 重金属暴露与帕金森病的相关性分析[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2014, 17(12): 16-17.
WANG Y, LIU J X, ZHU F Q. Study on the correlation of heavy metal exposure with Parkinson's disease[J]. Chinese Journal of Practical Nervous Diseases, 2014, 17(12): 16-17.
- [12] TYLER C R, ALLAN A M. The effects of arsenic exposure on neurological and cognitive dysfunction in human and rodent studies: a review[J]. Current Environmental Health Reports, 2014, 1(2): 132-147.
- [13] ALTHOBAITI N A. Heavy metals exposure and Alzheimer's disease: underlying mechanisms and advancing therapeutic approaches[J]. Behavioural Brain Research, 2025, 476: 115212.
- [14] 袁志鹰, 张梦通, 陈乃宏, 等. 百合药材、种植土壤及灌溉水

- 中农药及重金属残留分析[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(11): 1 943-1 949.
- YUAN Z Y, ZHANG M T, CHEN N H, et al. Analysis of pesticide and heavy metal residues in *Lilium lancifolium* Thunb., soil and irrigation water[J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(11): 1 943-1 949.
- [15] 李瑞琴, 于安芬, 白滨, 等. 食用百合—土壤体系中镉、铅和汞的潜在生态和健康风险[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 186-191.
- LI R Q, YU A F, BAI B, et al. Potential health and ecological risks of accumulation of cadmium, lead and mercury in soil-edible lily systems[J]. Food Science, 2016, 37(5): 186-191.
- [16] 林丽娥, 黄建辉. ICP-MS 法测定百合中三种重金属元素含量[J]. 中国民族医药杂志, 2023, 29(4): 42-44.
- LIN L, HUANG J H. Determination of three heavy metal elements in lilium by ICP-MS[J]. Journal of Medicine & Pharmacy of Chinese Minorities, 2023, 29(4): 42-44.
- [17] 吴家萌, 黄雅媛, 把德功, 等. 土壤镉对龙牙百合生长过程中生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 983-990.
- WU J M, HUANG Y Y, BA D G, et al. Effects of soil cadmium on physiological and biochemical characteristics of *Lilium brownii* var. *viridulum* during its growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(5): 983-990.
- [18] 雷星宇, 胡瑶, 邵颖, 等. 土壤镉污染对卷丹百合生长和镉分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, 61(9): 216-223.
- LEI X Y, HU Y, SHAO Y, et al. Effects of soil cadmium pollution on the growth and cadmium distribution of *Lilium lancifolium* Thunb[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023, 61(9): 216-223.
- [19] 郭婷, 何忠俊, 李冬雪, 等. 三七各器官 Cu、Cr、Cd、Pb 含量特征及其健康风险评估[J]. 广东农业科学, 2022, 49(1): 22-29.
- GUO T, HE Z J, LI D X, et al. Content characteristics and health risk assessment of heavy metals in various organs of *Panax notoginseng*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(1): 22-29.
- [20] 陈宏降, 罗益远, 彭昕, 等. 白及不同部位无机元素分布特征及其健康风险评估[J]. 中成药, 2023, 45(6): 2 079-2 085.
- CHEN H J, LUO Y Y, PENG X, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of inorganic elements in *Bletilla striata* (Thunb.) Reichb. f. and different parts[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(6): 2 079-2 085.
- [21] 罗益远, 王娟, 陈宏降, 等. 不同产地、不同部位乌药中 31 种无机元素测定及初步风险评估[J]. 药物分析杂志, 2022, 42(3): 424-432.
- LUO Y Y, WANG J, CHEN H J, et al. Determination and primary risk evaluation of 31 inorganic elements in *Lindera aggregata* (Sims) Kosterm. from different habitat and medication part[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2022, 42(3): 424-432.
- [22] 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): 3 094-3 099.
- 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): 3 094-3 099.
- [23] 周德来, 王行智, 张菁菁, 等. 甘草中无机元素的测定及健康风险评估研究[J]. 中药材, 2023, 46(8): 1 976-1 985.
- ZHOU D L, WANG X Z, ZHANG J J, et al. Determination of inorganic elements in *Glycyrrhizae Radix et rhizoma* and health risk assessment[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2023, 46(8): 1 976-1 985.
- [24] 李运, 戚鹏飞, 张晓萍, 等. 基于 ICP-MS 技术的六神曲中无机元素分析及其风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(9): 1 340-1 352.
- LI Y, QI P F, ZHANG X P, et al. Analysis and risk assessment of inorganic elements in *Liushenqu* based on ICP-MS technology[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(9): 1 340-1 352.
- [25] 洪家顺, 宁知贵, 李道成, 等. 基于 ICP-MS 的不同产地黄精元素差异分析及健康风险评估[J/OL]. 甘肃农业大学学报. (2024-06-05) [2025-01-22]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20240604.1606.002>.
- HONG J S, NING Z G, LI D C, et al. Analysis of elemental differences and health risk assessment of *Polygonati Rhizoma* from different regions based on ICP-MS[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University. (2024-06-05) [2025-01-22]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20240604.1606.002>.
- [26] 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): 1 041-1 046.
- 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): 1 041-1 046.
- [27] 刘海伟, 宗浩, 王海云, 等. 临沂植烟土壤重金属空间分布特征与生态健康风险评估[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(4): 41-49.
- LIU H W, ZONG H, WANG H Y, et al. Spatial distribution, potential ecological and health risk assessment of heavy metals in surface soils from tobacco cultivating areas of Linyi, Shandong Province, China[J]. Chinese Tobacco Science, 2018, 39(4): 41-49.
- [28] 周浪, 张云霞, 徐启翀, 等. 铜仁市土壤—玉米重金属含量及其健康风险[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 213-222.
- ZHOU L, ZHANG Y X, XU Q C, et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil-corn system of Tongren, China[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(1): 213-222.