DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260206001
引用格式: 杨元超, 郑彩玲, 王慧颖, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定桑黄中 6 种重金属元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 202–207.
Yang Yuanchao, Zheng Cailing, Wang Huiying, et al. Determination of 6 kinds of heavy metal elements in *Sanghuangporus* spp. by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 202–207. (in Chinese with English abstract).

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定桑黄中 6 种重金属元素

杨元超[1], 郑彩玲[1], 王慧颖[2], 金银兰[2], 刘 双[3], 莫 迥[4*], 王 熳[5]

(1. 延边农产品质量安全检测中心, 延吉 133000; 2. 龙井市农业生物资源和农村能源管理站, 龙井 133400; 3. 辽源市农业科学院, 辽源 136200; 4. 日喀则农畜产品质量安全检验检测中心, 日喀则 857000; 5. 吉林省生态环境监测中心, 长春 130000)

摘 要: 目的 建立微波消解–电感耦合等离子体质谱法同时测定桑黄中 Cr、Cu、As、Cd、Hg 和 Pb 元素含量的分析方法。**方法** 采用硝酸作为唯一消解试剂, 选择合适比例的 Au 元素作为 Hg 稳定剂, 以 ^{103}Rh 作为单一内标元素进行校正。**结果** 6 种重金属元素的线性回归方程相关系数均不低于 0.999, 方法检出限在 0.00009~0.00090 mg/kg 之间; 样品中各元素含量测定值的相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)在 1.79%~7.26%之间, 2 个不同浓度水平的加标回收率在 92.2%~105.2%之间。以该方法测试黄芪标准物质 GSB-19, 测量值均在标准值范围内, RSDs 在 1.54%~6.04%之间。**结论** 该方法准确可靠、快速高效、节省试剂, 适用于桑黄中重金属元素含量的分析检测。

关键词: 微波消解; 电感耦合等离子体质谱法; 桑黄; 重金属; 元素
中图分类号: TS57 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)13–0202–06

Determination of 6 kinds of heavy metal elements in *Sanghuangporus* spp. by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry

YANG Yuan-Chao[1], ZHENG Cai-Ling[1], WANG Hui-Ying[2], JIN Yin-Lan[2], LIU Shuang[3], MO Jiong[4*], WANG Man[5]

(1.*Yanbian Agricultural Product Quality and Safety Testing Center*, *Yanji* 133000, *China*; 2. *Longjing Agricultural Biological Resources and Rural Energy Management Station*, *Longjing* 133400, *China*; 3. *Liaoyuan Academy of Agricultural Sciences*, *Liaoyuan* 136200, *China*; 4. *Rikaze Agricultural and Livestock Product Quality and Safety Inspection and Testing Center*, *Rikaze* 857000, *China*; 5. *Jilin Provincial Ecological Environment Monitoring Center*, *Changchun* 130000, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for simultaneous determination of Cr, Cu, As, Cd, Hg and Pb in

收稿日期: 2026-02-06
基金项目: 延边州科技发展计划项目(2021ZH31)
第一作者: 杨元超(1985—), 男, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全检测。E-mail: yychao_2004@126.com
***通信作者:** 莫迥(1982—), 男, 高级兽医师, 主要研究方向为农畜产品质量安全检测。E-mail: 369839346@qq.com

Sanghuangporus spp. by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry. **Methods**　Nitric acid was used as the only digestion reagent, the appropriate proportion of Au element was selected as mercury stabilizer, and ^{103}Rh was used as the single internal standard element for correction. **Results**　The correlation coefficients of the 6 kinds of heavy metal elements were not less than 0.999, and the method limits of detection were 0.00009-0.00090 mg/kg. The relative standard deviations (RSDs) of each element content in the sample ranged from 1.79% to 7.26%, and the recoveries of 2 different concentrations ranged from 92.2% to 105.2%. The certified reference material of astragalus (GSB–19) was detected by this method, and the measured values were all within the range of standard values, with RSDs ranging from 1.54% to 6.04%. **Conclusion**　The method is accurate, reliable, rapid, efficient and reagent saving, and is suitable for the analysis and detection of heavy metal elements in *Sanghuangporus* spp..

KEY WORDS: microwave digestion; inductively coupled plasma mass spectrometry; *Sanghuangporus* spp.; heavy metal; element

0　引　言

桑黄(*Sanghuangporus* spp.)是隶属于桑黄孔菌属(*Sanghuangporus*)的一类大型多孔菌的总称[1], 目前已知世界范围内共有 16 个种[2], 分布于温带、热带及亚热带地区[3]。桑黄子实体含有多糖类、多酚类、黄酮类、三萜类等多种活性成分, 具有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节、保肝、消炎、降糖等功效[4–11], 是一种极具应用前景的药用真菌。

近年来, 我国桑黄产业规模不断扩大, 产生了较高的经济价值和社会效益, 绿色标准化生产和产品安全性评价成为制约其开发利用的限制因素[12–16]。重金属含量作为中药材的重要质量指标之一, 高效适用的元素分析方法对于桑黄资源的安全利用和标准化发展具有实际意义。

桑黄中元素含量检测的相关报道较少, 现有研究主要应用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)或电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)同时检测桑黄中多种元素, 用以对不同品种、不同栽培模式及不同产地的桑黄进行品质评价研究[17–21]。仅王振河等[22]应用 ICP-AES 测定了包括桑黄在内的 3 种药用真菌中的微量元素, 并进行了方法学实验。

ICP-MS 法具有灵敏度高、线性范围宽、抗干扰能力强、分析速度快等优点; 微波消解是结合密闭高压和微波进行消解的前处理技术, 具有操作简单、高效快速、密闭污染小、试剂用量少、元素不易损失等优点。本研究采用微波消解-ICP-MS 同时测定桑黄子实体中 Cr、Cu、As、Cd、Hg 和 Pb 6 种重金属元素含量, 选择合适比例的 Hg 元素稳定剂, 使用 Rh 作为单一内标元素, 以期为桑黄品质检测和质量监管提供一种准确、可靠、高效的分析检测方法。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

供试样品采集于延边州和龙市, 共 4 份, 样品编号分别为 CZ220213、CZ220214、CZ220215、CZ220216, 均为柞木段栽培 3 年生桑黄子实体。

Cr、Cu、As、Cd、Hg、Pb、Au、Rh 单元素标准溶液(质量浓度为 1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); ICP–MS 调谐溶液(质量浓度为 10 mg/L, 德国耶拿分析仪器股份公司); 硝酸(电子纯 BV–III, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 实验用水为纯净水(杭州娃哈哈集团有限公司); 黄芪标准物质 GSB–19(地球物理地球化学勘查研究所)。

1.2　仪器与设备

PlasmaQuant MS 型 ICP–MS 仪(德国耶拿分析仪器股份公司); ETHOS One 型微波消解仪(意大利迈尔斯通公司); CPA225D 型十万分之一电子天平(德国赛多利斯集团); ED16 型电热消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)。实验中用到的器皿和容器均用硝酸溶液(1:4, *V*:*V*)浸泡 24 h 以上, 纯水洗净后晾干备用。

1.3　实验方法

1.3.1　标准溶液配制

元素贮备溶液: 以硝酸溶液(1:49, *V*:*V*, 下同)为介质, 质量法配制单元素贮备溶液, 其中 Cr、Cu、Pb 质量浓度为 10000 μg/L, As、Cd、Hg 质量浓度为 100 μg/L。

汞稳定剂: 取 0.5 g Au 元素标准溶液, 用硝酸溶液定重至 50 g。

混合标准工作溶液: 取一定质量的各元素贮备溶液和汞稳定剂, 采用质量法, 通过硝酸溶液逐级稀释配制成含汞稳定剂的系列工作溶液, 其中 Au、Cr 质量浓度为 0、10、20、50、100、200 μg/L, Cu 质量浓度为 0、5、10、25、50、100 μg/L, Pb 质量浓度为 0、2.5、5.0、12.5、25.0、50.0 μg/L, As、Cd 质量浓度为 0、0.5、1.0、2.5、5.0、10.0 μg/L, Hg 质量浓度为 0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 μg/L。

内标溶液: 用硝酸溶液配制质量浓度为 20 μg/L 的 Rh 溶液作为内标使用液。

1.3.2 样品溶液制备

桑黄子实体去除表面杂物，于 60~70 ℃烘干至恒重，粉碎成粗粉备用。称取样品 0.2 g(精确至 0.0001 g)于 100 mL 微波消解罐中，加入 8 mL 硝酸，振荡混匀后加盖静置 30 min 以上，装入微波消解仪后按表 1 程序消解，冷却后取出，用少量纯水冲洗内盖，将消解罐放在电热消解仪上，120 ℃加热赶酸至剩余 1~2 mL，冷却后转移至容器，纯水定容至 25 mL，静置去除不溶杂质。同时制备实验全程序空白。

表 1 微波消解程序

Table 1 Procedure of microwave digestion

步骤	温度/℃	升温时间/min	恒温时间/min
1	120	5	5
2	150	5	10
3	190	5	20

1.3.3 ICP–MS 工作条件

在仪器最佳条件下(表 2)，将混合标准工作溶液按浓度从低到高依次注入 ICP-MS 仪，内标溶液由仪器同步在线加入，测定待测元素和内标元素的响应信号，以标准溶液中待测元素与内标元素响应信号值的比值为纵坐标，以待测元素的浓度为横坐标，绘制内标法校准曲线。再将全程序空白溶液和供试样品溶液同样依次注入仪器，扣除全程序空白的信号值后，通过校准曲线得到供试样品溶液中待测元素的浓度。

表 2 ICP-MS 仪器工作参数

Table 2 Instrument operation parameters of ICP-MS

工作参数	设定值	工作参数	设定值
射频功率/W	1350	雾化室温度/℃	3
等离子体气流量/(L/min)	9.0	采样锥/截取锥	镍锥
雾化气流量/(L/min)	1.00	采样深度/mm	5.0
辅助气流量/(L/min)	1.50	采集模式	跳峰
分析模式	碰撞	样品提升速率/(r/min)	15
碰撞气	氦气	每峰测定点数	1
氦气流量/(L/min)	110	重复次数	3
雾化器	同心雾化器	驻留时间/μs	20000

1.4 数据处理

应用 Excel 2016 软件对实验结果数据进行整理分析。

2 结果与分析

2.1 同位素和内标元素的选择

待测元素选择干扰少、丰度大的同位素，Pb 元素以 ^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb 之和为测试对象，^{75}As、^{114}Cd 通过干扰校正方程修正同量异位素、多原子离子等的干扰；6 种待测重金属元素均以 ^{103}Rh 作为内标。同位素、内标元素及干扰校正方程见表 3。

表 3 同位素和内标元素

Table 3 Isotopes and internal standard elements

元素	同位素(*m*/*z*)	内标元素	干扰校正方程
Cr	52	^{103}Rh	—
Cu	63		—
As	75		[^{75}As]=[75]–3.127×[77]+2.733×[82]–2.757×[83]
Cd	114		[^{114}Cd]=[114]–0.0268×[118]
Hg	202		—
Pb	206/207/208		—

注: —表示不使用干扰校正方程。

2.2 干扰及校正

ICP–MS 的干扰分为质谱干扰和非质谱干扰两类，质谱干扰主要来自同量异位素、氧化物、多原子离子及双电荷干扰[23–25]，通过设置干扰校正方程、开启碰撞模式、控制雾化室温度、优化射频功率等方式进行消除或补偿。

干扰校正方程是依据同位素的丰度，通过数学方程对质谱信号进行修正，可在一定程度上抵消质谱干扰，其理论是基于同位素丰度已知且在样品制备分析中不改变。这种方法是一种粗略的估算，实际测试时可能存在质量歧视，使实际值和理论值产生偏差。

^{75}As 与 ^{40}Ar^{35}Cl 质量重叠，可通过测定 ^{40}Ar^{37}Cl 计算 ^{40}Ar^{35}Cl 信号强度，则 [^{75}As]=[75]–(^{35}Cl 丰度/^{37}Cl 丰度)×[^{40}Ar^{37}Cl]=[75]–3.127×[^{40}Ar^{37}Cl]；而 ^{40}Ar^{37}Cl 又与 ^{77}Se 重叠，可测定 ^{82}Se 来计算 ^{77}Se 信号强度，则[^{40}Ar^{37}Cl]=[77]–(^{77}Se 丰度/^{82}Se 丰度)×[^{82}Se]=[77] –0.874×[^{82}Se]；^{82}Se 又受 ^{82}Kr 干扰，测定 ^{83}Kr 计算 ^{82}Kr 信号强度，则[^{82}Se]=[82] –(^{82}Kr 丰度/^{83}Kr 丰度)×[^{83}Kr]=[82]–1.009× [^{83}Kr]。综合以上 3 个等式，得到: [^{75}As]=[75]–3.127×[77]+2.733×[82]–2.757×[83]。

^{114}Cd 受到同量异位素 ^{114}Sn 干扰，可通过测定 ^{118}Sn 来计算 ^{114}Sn 信号强度，则[^{114}Cd]=[114]–(^{114}Sn 丰度/^{118}Sn 丰度)×[^{118}Sn]=[114]–0.0268×[118]。

Pb 有 4 种同位素，其中 ^{204}Pb 为非放射性衰变的稳定核素，丰度仅为 1.4%。^{206}Pb、^{207}Pb 和 ^{208}Pb 为放射性衰变产物，不同地质来源的 Pb 丰度可能不同，因此测定 Pb 的 3 种主要同位素加和可以得到更准确的测定值。

非质谱干扰来自物理效应和基体效应，使用内标法校正是一种最常用的降低基体效应和仪器波动的有效措施，内标应选择不存在于样品中并且性质稳定的元素，通常优先考虑与待测元素质量数、电离能相近的元素[26]，但赵小

学等[27–28]研究认为两者并非必要条件, 应优先选择样品中没有的元素, 并且内标元素不会对待测元素产生质谱干扰, 其实验也证实使用单一内标元素足以同时准确校正多个不同质量段的元素。本研究选择 ^{103}Rh 作为单一内标元素。

记忆效应也属于ICP-MS的一种非质谱干扰, 由于Hg元素会在容器及进样系统中产生强烈吸附, 从而产生记忆效应, 造成标准溶液和样品溶液中 Hg 含量的不稳定, 并且增加样品分析时的冲洗时间[29–30]。Au、Hg 两种元素可形成稳定的金汞齐, 减小这种记忆效应, 本研究通过在混合标准工作溶液中添加 Au 元素作为汞稳定剂, 金、汞质量比为 100:1。

有机样品的微波消解通常采用干扰少的 HNO_3–H_2O_2 体系, 但桑黄样品加入 H_2O_2 后会产生大量泡沫附着在消解管内壁, 本研究使用 HNO_3 作为唯一消解试剂, 具有同样良好的消解效果, 不易引入非金属元素质谱干扰和其他污染。

2.3　校准曲线与方法检出限

按1.3.3方法绘制内标校准曲线方程, 根据GB/T 37837—2019《四极杆电感耦合等离子体质谱方法通则》和 HJ 168—2020《环境监测分析方法标准制定技术导则》, 连续测定实验全程序空白溶液 11 次, 将溶液中各待测元素的质量浓度转换为质量分数, 计算标准偏差 S, 方法检出限(method detection limit, MDL)=3S, 结果保留 1 位有效数字, 且只入不舍, 结果见表 4。6 种重金属元素的线性回归方程相关系数均不低于 0.999, 方法检出限在 0.00009~0.00090 mg/kg 之间。

2.4　重复性与回收率

称取 CZ220215 号桑黄样品, 按照 1.3 方法平行制备 6 份进行测试, 计算各元素含量的平均值和 RSD, 验证方法重复性。精确称取上述样品 0.200 g, 根据样品中各元素的含量, 分别添加 2 组不同浓度水平的混合标准溶液, 每个浓度水平平行制备 6 份, 测试加标后元素含量, 以测定的 CZ220215 号样品中各元素含量平均值为本底, 计算回收率。重复性和回收率结果见表 5, 样品中 6 种重金属元素含量测定的 RSDs 在 1.79%~7.26%之间; 加标平均回收率在 92.2%~105.2%之间, 加标样品的 RSDs 在 0.76%~6.55%之间, 均符合 GB/T 27417—2017《合格评定 化学分析方法确认和验证指南》对方法回收率和实验室内变异系数的要求。

2.5　标准物质测定

选择黄芪标准物质 GSB-19 验证方法适用性和结果准确度, 按照 1.3 方法平行制备 6 份进行测试, 计算平均测定值和 RSDs, 结果见表 6。标准物质中测试元素含量均在标准值范围内, RSDs 在 1.54%~6.04%之间, 符合 GB/T 27417—2017 对实验室内变异系数的要求。

表 4　校准曲线方程和方法检出限

Table 4　Calibration curve equation and method limit of detection

元素	校准曲线方程	相关系数(r)	线性范围/(μg/L)	MDL/(mg/kg)
Cr	c/s=(237.0+96.91+727.2×conc)×[I/S Ratio]*	0.9996	0~200	0.00060
Cu	c/s=(76.0+61.02+758.6×conc)×[I/S Ratio]	0.9997	0~100	0.00090
As	c/s=(40.7+5.238+69.35×conc)×[I/S Ratio]	0.9995	0~10	0.00090
Cd	c/s=(2.2–5.927+878.9×conc)×[I/S Ratio]	0.9996	0~10	0.00030
Hg	c/s=(57.0+17.43+1338×conc)×[I/S Ratio]	0.9997	0~2	0.00009
Pb	c/s=(353.7+6258+16560×conc)×[I/S Ratio]	0.9996	0~50	0.00030

注: *表示式中 c/s 为信号响应, conc 为浓度, I/S Ratio 为内标因子。

表 5　方法重复性和回收率实验(n=6)

Table 5　Method repeatability and recoveries tests (n=6)

元素	平均本底值/(mg/kg)	RSDs/%	加标量/(mg/kg)	加标测定值/(mg/kg)	RSDs/%	回收率/%
Cr	9.0324	1.79	2.5000	11.3368	1.62	92.2
			6.2500	15.6043	1.34	105.2
Cu	2.6273	3.38	1.2500	3.9216	1.27	103.5
			3.1250	5.7409	1.49	99.6
As	0.1479	5.23	0.1250	0.2719	6.55	99.2
			0.3125	0.4696	1.49	102.9
Cd	0.0778	3.92	0.1250	0.2017	1.85	99.1
			0.3125	0.3821	0.96	97.4
Hg	0.0171	7.26	0.0250	0.0407	3.02	94.4
			0.0625	0.0807	1.54	101.8
Pb	0.3349	3.15	0.6250	0.9849	1.98	104.0
			1.5625	1.9099	0.76	100.8

表 6 标准物质测定结果(n=6)
Table 6 Reference materials test (n=6)

元素	标准值 /(mg/kg)	平均值 /(mg/kg)	RSDs/%
Cr	2.2±0.4	2.1883	4.88
Cu	8.5±0.7	8.0921	1.54
As	0.57±0.05	0.5790	4.03
Cd	0.042±0.010	0.0444	3.43
Hg	0.012*	0.0110	6.04
Pb	1.44±0.10	1.4360	4.08

注: *表示数值为参考值。

2.6 实际样品测定

应用上述方法测定其余 3 份桑黄样品 CZ220213、CZ220214 和 CZ220216, 每份样品平行制备 3 份, 测定结果取平均值, 结果和相关限量值见表 7。3 份供试样品中 Cu、As 含量均低于相关限量值; CZ220214 中的 Cd 含量高于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 WM/T 2-2004《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》给定的限量值, 而 CZ220216 中的 Cd 含量仅高于 GB 2762—2022 的限量值; CZ220213 中的 Hg 和 CZ220214 中的 Pb 分别高于 GB 2762–2022 中食用菌及其制品的甲基汞和 Pb 限量值; Cr 元素含量在 6 种元素中最高, 但 GB 2762–2022、WM/T 2–2004 和《中国药典》[31]均未给出限量值。

GB 2762—2022 作为食品安全国家标准规定的限量指标更加严格, 表 7 引用了该标准中食用菌及其制品的限量值。不同于常规的食用菌, 桑黄虽未列入《中国药典》, 但普遍作为一种药用真菌经炮制加工后使用, 考虑到其使用方式和用量, 《中国药典》和 WM/T 2–2004 中的限量指标更具有参考意义。

表 7 实际样品测定结果(mg/kg, n=3)
Table 7 Test results of actual sample (mg/kg, n=3)

元素	CZ220213	CZ220214	CZ220216	GB 2762–2022	WM/T 2–2004	中国药典
Cr	3.5071	14.3397	14.8885	—	—	—
Cu	2.3576	3.3612	2.7767	—	20.0	20.0
As	0.0706	0.3646	0.2240	0.5*	2.0	2.0
Cd	0.1150	0.3979	0.2975	0.2	0.3	1.0
Hg	0.1157	0.0968	0.0147	0.1#	0.2	0.2
Pb	0.0960	0.5224	0.3508	0.5	5.0	5.0

注: *为无机砷的限量值; #为甲基汞的限量值; —表示无限量值数据。

3 结论与讨论

本研究以 HNO_3 作为唯一消解试剂, 采用微波消解–ICP–MS 同时测定桑黄中 6 种重金属元素, 使用 Rh 作为单一内标元素同时校正多个待测元素, 以 Au 元素作为汞稳定剂, 有效消除 Hg 元素的记忆效应。由于 Hg 元素的不稳定, 在 GB 5009.268—2025《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》等标准方法中要求 Hg 标准溶液单独配制, 本方法避免了其单独配制和现用现配, 在内标元素和标准工作溶液的配制和使用上减少了工作量。

本方法的线性范围、相关系数、精密度、正确度均符合 GB/T 27417—2017 的方法确认要求, 相比已报道的 ICP–AES 方法[22]具有更低的方法检出限, 适用于桑黄子实体及饮片中 Cr、Cu、As、Cd、Hg 和 Pb 6 种重金属元素含量的分析检测, 具有准确可靠、快速高效、节省试剂的特点。

本研究供试的 4 份桑黄样品中 Cu、As、Cd、Hg、Pb 的含量均符合《中国药典》的限量指导值, 但部分样品无法满足更严格的食品安全和进出口标准。因此, 做好桑黄产业的深层次、全方位发展, 还应在生产环境、培养基质、炮制加工等方面加强质量控制, 完善标准体系。

参考文献

[1] 吴声华, 黄冠中, 陈愉萍, 等. 桑黄的分类及开发前景[J]. 菌物研究, 2016, 14(4): 187–200.
Wu Shenghua, Huang Guanzhong, Chen Yuping, et al. Taxonomy and development prospects of sanghuang (*Sanghuangporus sanghuang*) [J]. Journal of Fungal Research, 2016, 14(4): 187–200.

[2] 万茜淋, 吴新民, 杨雪, 等. 桑黄孔菌属的化学成分及药理作用研究进展[J]. 菌物研究, 2022, 20(1): 65–71.
Wan Xilin, Wu Xinmin, Yang Xue, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activity of *Sanghuangporus* [J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(1): 65–71.

[3] 朱琳, 崔宝凯. 药用真菌桑黄的研究进展[J]. 菌物研究, 2016, 14(4): 201–209.
Zhu Lin, Cui Baokai. Progress on the studies of medicinal mushrooms “Sanghuang” group [J]. Journal of Fungal Research, 2016, 14(4): 201–209.

[4] 张维博, 王家国, 李正阔, 等. 药用真菌桑黄的研究进展[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(15): 2838–2845.
Zhang Weibo, Wang Jiaguo, Li Zhengkuo, et al. Progress of studies on medicinal fungus *Phellinus* [J]. China Journal of Chinese Materis Medica, 2014, 39(15): 2838–2845.

[5] 昝立峰, 包海鹰, 李丹花. “桑黄”类真菌中多酚物质及其生物活性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(1): 147–155.
Zan Lifeng, Bao Haiying, Li Danhua. Review on polyphenol components from medicinal fungi “Sanghuang” and their biological activity [J]. Natural Product Research and Development, 2016, 28(1): 147–155.

[6] 王豪, 钱坤, 司静, 等. 桑黄类真菌多糖研究进展[J]. 菌物学报, 2021, 40(4): 895–911.

Wang Hao, Qian Kun, Si Jing, et al. Research advances on polysaccharides from sanghuang [J]. Mycosystema, 2021, 40(4): 895–911.

[7] 李帅帅. 桑黄的化学成分及其抗炎活性研究[D]. 延吉: 延边大学, 2015.
Li Shuaishuai. Study on chemical constituents from *Phellinus Igniarius* (L. ex Fr.) Quel and their anti–inflammatory activities [D]. Yanji: Yanbian University, 2015.

[8] 刘谟浩, 曾建红. 桑黄化学成分及其抗肿瘤作用机制研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(8): 275–282.
Liu Mohao, Zeng Jianhong. Research progress on chemical constituents of Phellinus and its antitumor mechanism [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2023, 29(8): 275–282.

[9] 钱骅, 赵伯涛, 陈斌, 等. 桑黄子实体多糖、黄酮和多酚含量与抗氧化活性相关性[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 104–108.
Qian Hua, Zhao Botao, Chen Bin, et al. Relationship between the content of polysaccharides, flavonoids and polyphenols from the sporocarp of Phellinus Linteus and the antioxidant activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(12): 104–108.

[10] 逄梦玉, 隋昕怡, 刘丹, 等. 桑黄多糖提取工艺优化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 48–57.
Pang Mengyu, Sui Xinyi, Liu Dan, et al. Optimization of extraction process, structural characterization and antioxidant activity of sanghuangporous sanghuangpolysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(12): 48–57.

[11] 刘梦凡, 殷朝敏, 张琪, 等. 比较 3 种杨树桑黄提取物体外抗氧化、降血糖和抑菌活性[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 18–25.
Liu Mengfan, Yin Chaomin, Zhang Qi, et al. Comparison of *in vitro* antioxidant, hypoglycemic and antibacterial activities of different extracts from 3 kinds of *Sanghuangporus vaninii* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 18–25.

[12] 杨焱, 陈晓华, 戴玉成, 等. 我国桑黄产业发展现状、问题及展望: 桑黄产业发展千岛湖宣言[J]. 菌物学报, 2023, 42(4): 855–873.
Yang Yan, Chen Xiaohua, Dai Yucheng, et al. Sanghuang industry in China: Current status, challenges and perspectives: the qiandao lake declaration for sanghuang industry development [J]. Mycosystema, 2023, 42(4): 855–873.

[13] 长城, 郑海婷, 于文杰, 等. 桑黄质量标准研究进展及制定建议[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 801–806.
Chang Cheng, Zheng Haiting, Yu Wenjie, et al. Development and suggestions on quality standard of *Sanghuang* mushroom [J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2020, 21(6): 801–806.

[14] 吴声华, 戴玉成. 药用真菌桑黄的种类解析[J]. 菌物学报, 2020, 39(5): 781–794.
Wu Shenghua, Dai Yucheng. Species clarification of the medicinal fungus sanghuang [J]. Mycosystema, 2020, 39(5): 781–794.

[15] 秦悦, 何淑娴, 许彦鹏, 等. 吉林省桑黄产业发展现状及展望[J/OL]. 菌物研究, 2025–12–03. https://doi:10.13341/j.jfr.2025.1947.
Qin Yue, He Shuxian, Xu Yanpeng, et al. Current status and perspectives for the sanghuang industry in Jilin Province [J/OL]. Journal of Fungal Research, 2025–12–03. https://doi: 10.13341/j.jfr.2025.1947.

[16] 周丽洁, 尹航, 金雪梅, 等. 延边州桑黄产业现状、问题及发展对策[J]. 食用菌, 2025, 47(3): 100–102, 105.
Zhou Lijie, Yin Hang, Jing Xuemei, et al. Current status, challenges and perspectives for the sanghuang industry in Yanbian [J]. Edible Fungi, 2025, 47(3): 100–102, 105.

[17] 长城, 郑海婷, 孙梦琪, 等. 三种桑黄类真菌多指标活性成分和有害重金属含量测定[J]. 菌物学报, 2023, 42(4): 1023–1036.
Chang Cheng, Zheng Haiting, Sun Mengqi, et al. Determination of multi–index bioactive components and harmful heavy metal elements of three species of sanghuang mushrooms [J]. Mycosystema, 2023, 42(4): 1023–1036.

[18] 刘笑笑, 张振都, 张奇, 等. 桑黄子实体中硒元素及重金属含量分析[J]. 北方园艺, 2022, 2022(5): 104–111.
Liu Xiaoxiao, Zhang Zhendu, Zhang Qi, et al. Analysis of selenium and heavy metals content in phellinus linteus fruiting bodies [J]. Northern Horticulture, 2022, 2022(5): 104–111.

[19] 王辉, 王乐奇, 杨树东, 等. 朝药桑黄的质量标准研究[J]. 中国当代医药, 2021, 28(26): 8–13.
Wang Hui, Wang Leqi, Yang Shudong, et al. Study on quality standard of sanghuang of North Korea medicine [J]. China Modern Medicine, 2021, 28(26): 8–13.

[20] 叶玉洁, 石光, 周正乙, 等. 桑黄菌丝体与子实体成分的比较分析[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 246–251.
Ye Yujie, Shi Guang, Zhou Zhengyi, et al. Comparative chemical composition of mycelium and fruit body of phellinus igniarius [J]. Food Science, 2019, 40(24): 246–251.

[21] 李婉茹, 何峰. 不同产地桑树桑黄的总黄酮量和部分金属元素含量的比较[J]. 新农民, 2024, 2024(10): 56–58.
Li Wanru, He Feng. Comparison of total flavonoids and partial metal element contents in mulberry sanghuang from different origins [J]. New Farmers, 2024, 2024(10): 56–58.

[22] 王振河, 王斌, 霍云凤. 微波溶样 ICP-AES 法测定三种珍稀药用真菌中的微量元素[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(6): 59–63.
Wang Zhenhe, Wang Bin, Huo Yunfeng. Determination of elements in rare officinal fungus of wolfiporia cocos, phellinus igniarius and inonotus obliquus by microwave digestion-ICP-AES [J]. Guangdong Weiliang Yuansu Kexue, 2007, 14(6): 59–63.

[23] 赵小学, 张霖琳, 张建平, 等. ICP-MS 在环境分析中的质谱干扰及消除[J]. 中国环境监测, 2014, 30(3): 101–106.
Zhao Xiaoxue, Zhang Linlin, Zhang Jianping, et al. Spectral interference and elimination of environmental analysis with ICP-MS [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(3): 101–106.

[24] 徐聪, 赵婷, 池海涛, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定土壤及耕作物小麦中 8 种重金属元素[J]. 中国测试, 2019, 45(5): 85–92.
Xu Cong, Zhao Ting, Chi Haitao, et al. Determination of eight kinds of heavy metal elements in cultivated soil and the wheat by microwave digestion-ICP-MS method [J]. China Measurement and Test, 2019, 45(5): 85–92.

[25] 余莲芳, 刘剑波, 高炜. 微波消解-电感耦合等离子体质谱联用法检测岳阳市 3 大名优特产中金属元素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 1125–1130.
Yu Lianfang, Liu Jianbo, Gao Wei. Determination of metal elements in 3 famous specialties of Yueyang city by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3): 1125–1130.

[26] Agatemor C, Beauchemin D. Matrix effects in inductively coupled plasma mass spectrometry: a review [J]. Analytica Chimica Acta, 2011, 706: 66–83.

[27] 赵小学, 赵宗生, 陈纯, 等. 电感耦合等离子体-质谱法内标元素选择的研究[J]. 中国环境监测, 2016, 32(1): 84–87.
Zhao Xiaoxue, Zhao Zongsheng, Chen Chun, et al. Study on selection of internal standard element of ICP-MS [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(1): 84–87.

[28] 赵小学, 袁懋, 闫峰, 等. 微波消解/ICP-MS法测定粮食中的18种痕量元素[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 609–613.
Zhao Xiaoxue, Yuan Mao, Yan Feng, et al. Determination of 18 trace elements in grains by ICP-MS with microwave digestion [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 609–613.

[29] 赵小学, 赵宗生, 王玲玲. 水中汞的电感耦合等离子体-质谱法测定[J]. 中国测试, 2013, 39(6): 50–52.
Zhao Xiaoxue, Zhao Zongsheng, Wang Lingling. Determining mercury in water by ICP-MS [J]. China Measurement and Test, 2013, 39(6): 50–52.

[30] 卢水淼, 李鹰, 李剑, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定地表水中汞及其记忆效应的消除[J]. 理化检验–化学分册, 2019, 55(10): 1222–1224.
Lu Shuimiao, Li Ying, Li Jian, et al. Determination of mercury in surface water by ICP-MS and elimination of memory effects [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2019, 55(10): 1222–1224.

[31] 国家药典编委会. 中华人民共和国药典: 2020 年版. 四部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 522.
Chinese Pharmacopoeia Compilation Committee. Chinese pharmacopoeia: 2020 Edition. Part 4 [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 522.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)