

潮州中草药重金属污染的空间分布特征与溯源分析：基于 ICP-MS 与多元统计方法

张煜帆 许晓虹 蔡杏粧 余溢彬 陈琰 (通讯作者)

潮州市药品检验所, 广东潮州, 521000;

摘要: 目的: 为建立潮州中草药中 36 种金属元素的电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析方法, 该文对潮州不同地区中的金属元素含量进行比较分析, 讨论其污染来源并提出科学的对策。方法: 本研究将采集的样品经微波消解预处理后, 采用电感耦合等离子体-质谱法测定 36 种重金属元素的含量。进而, 综合运用系统聚类分析、主成分分析及 3D 散点图分析, 对潮州地区 71 批中草药样品的重金属含量累积特征进行了系统解析。结果: 潮州中草药的 36 种重金属含量不仅均未超出安全阈值, 且 Pb、Cd、As、Cu 等元素浓度远低于《中国药典》标准。通过聚类分析等进一步表明, 其污染分布与地方产业布局高度关联, 由此提示了工业污染作为重要来源的潜在风险。结论: 本研究通过解析中草药金属元素的空间分布规律, 揭示了潮州地区产业布局对其生长环境的深刻影响机制, 为指导该地区建立科学、前瞻性的重金属污染防范体系提供了关键数据支撑与决策依据。

关键词: 金属元素; ICP-MS; 聚类分析

DOI: 10.69979/3029-2808.26.03.021

在“回归自然”与“中医药国际化”背景下, 中草药质量安全问题日益受到关注^[1]。潮汕地区位于广东省东南沿海, 独特的地理气候条件孕育了丰富的中草药资源^[2,3]。该区域不仅分布有《中国药典》收录的山银花、桑叶等品种, 还包括“叶下红”“铺地锦”等民间习用药材^[4]。潮汕民众历来有采草药煎煮凉茶^[5]或捣敷外用^[6]的传统, 这些习俗已成为地方文化的重要组成部分。值得注意的是, 当地草药多依赖野外采集, 缺乏规范种植。中草药作为直接从环境中汲取养分的生物体, 易通过根系吸收和叶片吸附等途径富集铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、铜(Cu)等重金属元素^[7-9]。这些重金属不仅可能影响药效, 更可通过食物链传递对人体造成多系统毒性损害, 严重威胁用药安全^[10]。因此, 对中草药中重金属污染实施有效监测与溯源, 成为保障质量安全的关键环节。

目前, 相关研究多集中于单一药材或市场抽样分析, 针对潮汕这一独特地理人文区域的系统性调查仍较缺乏。传统评价重金属污染方法大多停留在浓度层面, 难以有效识别污染来源。由于重金属来源复杂^[7-9], 既可能源于成土母质等自然背景, 也可能来自工业排放、农业活动等人为输入, 因此, 若不明确主要污染源, 将缺乏具有针对性的治理措施。

本研究选取潮州市作为研究对象, 其对草药的应用

习惯与潮汕地区一脉相承, 兼既有传统农耕区^[11], 也有发达的陶瓷、不锈钢等工业区^[12-14], 为探究工业化背景下草药重金属污染问题提供了理想样本。本研究采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对 71 批草药样品中的 36 种金属元素含量进行测定, 并结合主成分分析、聚类分析与空间分析等多元统计方法, 解析其重金属污染的空间分布规律, 并对污染来源进行分析, 为构建科学有效的区域重金属污染防控体系提供理论依据和数据支撑。

1 仪器与设备

1.1 主要仪器

ICPMS-iCAPRQ 电感耦合等离子体质谱分析仪 (THE RMO); MARS2 微波消解仪 (培安 CEM 微波化学技术中心 MARS2); XSR204 分析天平 (梅特勒), 超纯水机 (四川优普超纯科技有限公司)

1.2 试剂与试药

硝酸 ($\rho_{20}=1.42\text{g/mL}$, 优级纯, Merck); 铅、砷、镉等 36 种金属元素标准溶液 (国家钢铁材料测试中心)

1.3 样品

共收集草药样品 71 批, 购自市场或在野外采集而得, 样品以采样地点分组编号, 分别是: 古巷镇(T1、T

4、T5)；登塘镇(T2、T3)；彩塘镇(T6、T7、T8)。采集回来的样品经清洗干净后自然晾干、用粉碎机进行粉碎。

2 方法与结果

2.1 溶液的配制

2.1.1 标准品溶液的配制

(1) 混合标准使用液：锂(Li)、铍(Be)、钪(Sc)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、砷(As)、铷(Rb)、锶(Sr)、银(Ag)、镉(Cd)、铟(In)、铯(Cs)、钡(Ba)、铊(Tl)、铅(Pb)、铋(Bi)、钍(Th)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、镝(Dy)、铒(Er)、铕(Eu)、钆(Gd)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Y)、铟(Yb) [$\rho=10.0\text{mg/L}$]。

(2) 标准系列溶液的制备：取混合标准使用液 0.0 mL、0.10 mL、0.50 mL、1.00 mL、5.00 mL、10.0 mL 于 10 mL 容量瓶中，加 0.5 mol/L 硝酸至刻度，摇匀，配制成浓度分别为 0.00 $\mu\text{g/L}$ 、1.00 $\mu\text{g/L}$ 、5.00 $\mu\text{g/L}$ 、10.0 $\mu\text{g/L}$ 、50.0 $\mu\text{g/L}$ 、100 $\mu\text{g/L}$ 的混合标准系列溶液。

(3) 内标使用液：用 0.5 mol/L 硝酸配成浓度为 20 $\mu\text{g/L}$ 的 (Re+Rh) 混合内标使用液。

2.1.2 供试品溶液的制备

称取样品 0.5 g (精确到 0.0001 g)，置于清洗好的聚四氟乙烯消解罐内，同时做试剂空白。

样品先加入硝酸 3.0 mL~5.0 mL，静止过夜，充分作用。然后再依次加入过氧化氢 1.0 mL~2.0 mL，将消解罐晃动几次，使样品充分浸没。放入恒温电加热设备中 100°C 加热约 30 min 取下，冷却。把装有样品的消解罐拧上罐盖，放进微波消解仪中。同时严格按照微波消解系统操作手册进行操作，消解程序见表 1。根据样品消解难易程度在 30 min 内消解完毕，取出冷却，开罐，将消解好的含样品的消解罐放入 100°C 电加热器中数分钟，驱除样品中多余的氮氧化物，以免干扰测定。将消解完的样品移至 25 mL 具塞比色管中，用水洗涤消解罐数次，合并洗涤液，用水定容至 25 mL，备用。

表 1 消解时温度时间程序

温度 (°C)	升温时间 (min)	保持时间 (min)
120	5	3
160	5	3
180	5	20

2.2 仪器条件

用调协液调整仪器各项指标，使仪器灵敏度、氧化

物、双电荷、分辨率等指标达到要求。射频功率：1550 W；等离子体氩气流速：14 L/min；雾化器氩气流速：1 mL/min；采样深度：5 mm；雾化室温度：4°C；采样锥与截取锥类型：镍锥；模式：碰撞反应模式。

2.3 样品的测定

将制备好的对照品溶液、样品溶液和相应的空白溶液，在 ICP-MS 的工作条件下进行测定。

2.3.1 线性关系考察

根据“2.1.1”项方法，依次测定 36 种金属元素的标准溶液，按测定条件以标准品质量浓度为横坐标 (X)，标准品峰强度为纵坐标 (Y)，绘制标准曲线，得到各元素的线性范围和相关系数。结果相关系数均大于 0.999。

2.3.2 精密度试验

取 22 种金属元素标准溶液各自连续进样 6 次，22 种元素的 RSD 值在 0.4%~2.1% 之间，表明仪器的精密性良好。

3 结果与分析

3.1 重金属含量分析

本实验采用 ICP-MS 法测定 71 批野外采集的草药 36 种金属元素含量，Pb、Cd、As、Cu 4 种元素是目前中药材与饮片中严格控制的有害物质，参照现行《中国药典 2020》药材及饮片 (植物类) 重金属限量指标： $\text{Pb} \leq 5\text{mg/kg}$ ， $\text{Cd} \leq 1\text{mg/kg}$ ， $\text{Cu} \leq 20\text{mg/kg}$ ， $\text{As} \leq 2\text{mg/kg}$ ，在本研究 71 批草药中这四种重金属的检测结果显示虽然均远低于标准限制范围，但均能检测出一定的浓度，其结果可能是植物生长区域主要在以陶瓷、不锈钢等为主要产业的城镇有关。尽管如此，其结果也与草药生长周期及生长过程中对重金属元素的吸收富集能力和土壤中的重金属元素含量密切相关，因此，说明本地区的土壤及气候环境对各类草药的生长要求是有利的。

3.2 不同青草药中金属元素的聚类分析

采用系统聚类分析方法，选择组间距离法 (between-groups linkage) 为聚类方法，欧氏距离平方方法 (squared euclidean distance) 为测量距离方法进行聚类分析，将 71 批草药金属元素含量数据作为量化指标，得到 36×71 阶的数据矩阵，应用 SPSS 30.0 (Windows 3.0.0, SPSS Inc, USA) 软件建立基于不同草药金属分析结果的树状聚类谱图。

由聚类树状图可知,当 $\lambda < 5.0$ 时,71批样品明显可以分为3类。根据各类草药的重金属含量特征,第一类可定义为“特异富集型”,主要包括T2-05, T4-05, T4-06等,其中最典型的代表是登塘镇(T2-05)的“猫毛草”,该类青草药共同的特征是富集了异常高浓度的稀土元素及相关重金属,其生长环境极可能位于地质高背景区或受到陶瓷原料污染^[15]的强烈影响,具有独特的“化学指纹”。第二类重金属污染可以定义为“锰特异富集型”,这一类的草药是受单一锰污染源强影响的群体,主要包括古巷镇(T1系列)和彩塘镇(T6系列)等,在古巷镇、登塘镇等陶瓷产区,它主要源于陶瓷釉料和颜料的使用与排放^[16-18],而在彩塘镇等不锈钢产区,则主要源于不锈钢冶炼与加工过程中的锰排放^[19,20]。这表明,无论是陶瓷厂还是不锈钢厂,只要其生产活动涉及锰的利用,就可能在周边形成局部的“锰污染热点”,对当地生长的青草药构成特异性富集风险。第三类包含了剩下的27类中草药,其重金属体内分布具有普遍性,囊括了来自所有采样区域的绝大多数样本,特别是彩塘镇(不锈钢产区)和古巷镇(陶瓷产区)的大量样本。这些样本虽然因其重金属含量不同,而在聚类树内部有细微差别,但都已显著受到当地陶瓷和不锈钢工业活动所排放的重金属混合污染。这个庞大群体的存在,证明工业污染的影响并非局限于少数几个热点,而是已经形成了大范围的、复杂的污染背景场。

4 讨论与结论

本研究首次对潮州地区的草药进行收集整理,通过对潮州市71批草药进行系统的重金属含量检测与多元统计分析,全面评估了其污染特征、来源,并给出相应的建议。

含量分析表明,所有样品中Pb、Cd、As、Cu四种有害元素的含量均远低于《中国药典2020版》的限量标准,这从直接监管层面肯定了这批草药的初步安全性。然而,所有样品均能检出这些元素,这一事实本身暗示了外源性污染的存在。结合潮州作为重要工业城市的基本情况,可以合理推断,这种普遍检出的背景值与当地广泛的工业活动存在潜在关联。

了解草药群体的整体污染格局,我们首先进行了聚类分析。结果将71批样品清晰地划分为三个具有明确环境意义的类群:“普遍污染型”构成了最主要的群体,揭示了多源重金属复合污染是潮州地区的普遍现状;

“锰特异富集型”类群的出现,指示了存在独立且局地性的点源污染;而“特异富集型”则指向了特定的地质高背景或历史强污染点位。这一分类从宏观上描绘了污染的空间异质性。

尽管潮州草药当前重金属含量未超出安全阈值,但其整体已受到陶瓷与不锈钢工业活动带来的多源重金属复合污染影响,污染空间格局与产业布局高度吻合。这种“含量低但来源明”的状况,具有重要的预警意义——它标志着工业排放已成为影响区域环境质量和生态安全不可忽视的因素。

因此,我们建议采取三点前瞻性的环境管理策略:第一,实施“分区精准防控”,对产业聚集区,针对其主导污染源实施针对性减排。第二,建立区域协同机制,控制陶瓷污染物对下风向区域的跨界影响;第三,建立“草药生物监测网络”,将其作为指示物种,用于持续监控环境中低浓度、慢性累积的工业污染动态,实现从“终端达标”向“过程风险防控”的转变,从而更早、更主动地保障区域生态与中药材安全。

参考文献

- [1]肖小河,李寒冰,赵旭,等.新形势下的中药大质量观及实践[J].中草药,2025,56(01):1-8.
- [2]黄崇才,黄晓霞,杨培新.潮汕民间草药排草香本草考证[J].食品安全导刊,2017,(26):74-75.
- [3]陈树思,唐为萍.潮汕地区防治糖尿病的植物资源[J].资源开发与市场,2004,(02):137-138.
- [4]周燕芳.潮汕地区40种常用中草药中黄酮的测定[J].湖北农业科学,2012,51(13):2831-2834.
- [5]黄汉辉.着眼地方文化的项目学习探索——基于潮汕“青草水”的“辨草制凉茶”项目简述[J].湖北教育(科学课),2024,(11):75-77.
- [6]陈汉初.试论潮汕民间祖传手抄中医秘方的重要价值[J].岭南文史,2015,(02):46-51+61.
- [7]林新文,朱毅,关冰圆,等.中药材农药残留和重金属/有害元素污染现状分析及防控对策[J].中国药业,2025,34(12):27-29.
- [8]张蓝月.中药重金属污染的现状与治理对策概况[J].福建质量管理,2015,(10):67.
- [9]张慧莉.我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J].山东化工,2018,47(01):56-57.
- [10]左甜甜,刘佳琳,李依玲,等.中草药重金属及有害

元素健康风险评估新视角——概率风险评估,以车前草为例[J]. 药学学报,2022,57(11):3365-3370.

[11]焦华娟. 饶本《潮州志》在编纂农史资料上的体例创新和发展[J]. 东方收藏,2025,(05):54-56.

[12]李华清. “瓷都”潮州:探路高技术陶瓷[N]. 经济观察报,2022-08-15(023).

[13]千年窑址笔架山生生不息潮州瓷[N]. 安阳日报,2024-07-02(003).

[14]郑健. 潮州潮安镇:不锈钢产业实现新跨越[N]. 中华建筑报,2006-08-24(005).

[15]周倩,刘浩,王周福,等. 稀土金属氧化物对碳化硅复合陶瓷结构与性能的影响[J]. 武汉科技大学学报,2025,48(05):394-400.

[16]于京令,郭志勇,朱勇宾. 日用陶瓷制品元素迁移及铜、锰迁移量风险分析[J]. 中国建材科技,2023,32(05):92-94.

[17]戴长禄,杨勇,杨明. 锰在建筑陶瓷釉料以及微晶玻璃中的作用与影响[J]. 佛山陶瓷,2011,21(08):40-

42+52.

[18]郭志山,高温锰红陶瓷釉料的研究与应用. 广东省,广东宝丰陶瓷科技发展股份有限公司,2020-12-16.

[19]全书仪. 层状异构节镍奥氏体不锈钢的制备、力学性能及晶间腐蚀行为研究[D]. 北京科技大学,2025.

[20]包文红,张应龙. 新型高锰低镍奥氏体不锈钢性能研究[J]. 机械研究与应用,2024,37(04):54-56.

作者简介:张煜帆(1987.01-),男,汉族,广东潮州人,本科,主管药师,潮州市药品检验所,研究方向:药物检验和合理用药。

通讯作者:陈琰(1975.09-),男,汉族,广东潮州人,本科,主管药师,潮州市药品检验所,研究方向:药物检验和合理用药。

基金项目:潮州市科学技术局2022年潮州市科技计划公益技术研究与应用示范类项目-潮州地区习用药材(草药)重金属质量风险研究(编号:2022ZC26)