

基于土壤元素沿经度分异特征的川芎传统道地产区 自然边界探索

方千, 严铸云, 吕宏阳, 贾红梅, 张秫华, 王海, 何冬梅*

(成都中医药大学 中药材标准化省部共建教育部重点实验室, 四川省中药资源系统研究与开发利用
省部共建国家重点实验室培育基地, 成都 611137)

[摘要] 目的:分析川芎传统道地产区及沿经度向南连续扩展区域的土壤元素分异特征,从土壤无机元素层面寻找道地川芎产区的自然环境边界。方法:采用X射线荧光光谱法(XRF)及ICP-MS等技术分别测定土壤及川芎植株中24种元素的含量,利用spearman相关检验分析根际土壤与川芎各部位间无机元素的相关性,筛选“特征元素”;基于全元素及“特征元素”的Bray-Curtis相似性指数对土壤样本分别进行层次聚类分析,确定与川芎传统道地产区土壤元素特征相似的样地范围。结果:测定元素中,K,Mg,Mn,Rb元素在根际土壤与川芎植物中明显相关。全元素及4种特征元素的地理分异特征均显示川芎传统道地产区与其临近扩展区域S1~S6(除S4)样地土壤元素分布呈现高度相似性;S14~S16样地与传统道地产区的相似度次之;扩展区域中段S7~S13样地与传统道地产区呈现较大差异。结论:研究区域内土壤元素特征不完全受地理距离控制,沿经度呈现“断层式”分布格局。此研究为川芎的栽培适宜区的确立提供了一定的理论依据,其道地产区的自然边界或可由传统的都江堰产区向南延伸60公里至邛崃境内。此外,K,Mg,Mn,Rb特征元素或可作为评估川芎适宜土壤环境的潜在标记因子。

[关键词] 川芎; 土壤; 无机元素; 道地产区; 自然边界

[中图分类号] R284.2;R289;R22;R2-031 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2020)18-0145-09

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20201914

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20200715.1446.002.html>

[网络出版日期] 2020-7-15 16:03

Research on Natural Boundary of Traditional Geo-authentic Origin of *Ligusticum chuanxiong* via Soil Elements Characteristics Along Same Longitude

FANG Qian, YAN Zhu-yun, LYU Hong-yang, JIA Hong-mei, ZHANG Shu-hua, WANG Hai,
HE Dong-mei*

(Chengdu University of Traditional Chinese Medicine (TCM), Key Laboratory of Standardization of
Traditional Chinese Medicinal Herbs Co-sponsored by Province and Ministry of Education, State Key
Laboratory and Breeding Base of Systematic Research, Development and Utilization of
TCM Resource Co-sponsored by Province and Ministry of Education, Chengdu 611137, China)

[Abstract] **Objective:** To find the natural environmental boundary of the origin of the authentic *Ligusticum chuanxiong* by analyzing the distribution characteristics of soil elements in the traditional geo-authentic area and the southern continuous expanding areas along the same longitude. **Method:** The contents of 24 elements both in soil and plant *L. chuanxiong* samples were determined by using X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and ICP-MS, etc. Spearman correlation test was used to evaluate the correlations of rhizosphere soil and each portion of *L. chuanxiong*, to screen out “characteristic elements”. Bray-Curtis similarity

[收稿日期] 20200628(020)

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81673553)

[第一作者] 方千,在读硕士,从事中药品质与资源应用研究,E-mail:qianffang@163.com

[通信作者] *何冬梅,副教授,从事中药微生态与中药资源研究,Tel:028-61801313,E-mail:hedongmei@edutcm.edu.cn

indexes based on all elements and "characteristic elements" were used for hierarchical cluster analysis of soil samples, to identify the sample range with similar soil element characteristics to the traditional geo-authentic area of *L. chuanxiong*. **Result:** K, Mg, Mn and Rb elements were significantly correlated in rhizosphere soil and plant *L. chuanxiong*. Geographical differentiation of all elements and four characteristic elements showed that there was a highest similarity between geo-authentic area and its neighbor plots S1-S6 (except plot S4) in soil elements distribution, followed by plots S14-S16. The middle section plots S7-S13 in the expansion areas were quite different from the traditional geo-authentic production areas. **Conclusion:** The soil element characteristics in the study areas were not completely controlled by geographical distance, but demonstrated the "fault" variation in the areas along longitude. This study provides a theoretical basis for the determination of suitable cultivation area for *Ligusticum Chuanxiong*, and the natural boundary of its geo-authentic area may be extended an additional 60 km southward along longitude beyond the traditional origin. Additionally, K, Mg, Mn and Rb characteristic elements may be the potential markers to evaluate the suitable soil environment for cultivating *L. chuanxiong*.

[Key words] *Ligusticum chuanxiong*; cultivated soil; inorganic elements; geo-authentic area; natural boundary

川芎为伞形科植物川芎 *Ligusticum chuanxiong* 的干燥根茎^[1],自宋代以来均以四川都江堰市(旧称“灌县”)金马河上游以西区域为传统道地产区^[2],是典型的单道地药材,无野生仅栽培种。近年来,因耕地用途的改变,传统道地产区川芎种植面积逐步萎缩,四川彭州、眉山等地继而成为了川芎新的主产区,随其产地迁移,药材质量差异问题愈发突出。从古至今,药材道地产区的范围主要依附于行政区域的划分,其自然地理边界并不清楚。因此,探寻川芎道地产区的自然属性,明确其适宜的环境因子边界,对科学有序的产地扩张或迁移,药材质量的保证,道地药材声誉的维护等都极为重要。

土壤是陆生植物生活的基质,直接影响植物生长和生理代谢活动^[3-4],受自然和社会因素影响,土壤具备空间连续变异的性质,不同尺度呈现出不同程度的异质性^[5],势必导致产地间药材品质的差异性。其中,土壤中的无机元素、药材无机元素及其品质三者间密切相关^[6],周光皎等^[7]研究发现,亳白芍产区土壤中Ca, Al, Ti等10种元素含量与药材元素含量显著相关,其中,Al, Ti等元素与没食子酸、芍药苷等药效成分明显相关。杨月等^[8]研究证实,三七产区土壤元素多影响药材中元素含量分布,且文山州道地产区土壤和药材中人体必须微量元素(Fe, Cr, Zn)均高于玉溪、曲靖及红河产地。陈林等^[9]对四川境内5个不同产地来源的川芎进行比较研究,发现药材中近20种无机元素的含量与产区土壤中相应元素含量呈正相关,且不同种植区土壤中元素特征区别明显。可见,土壤及药材无机元素的

区间差异性被诸多研究证实^[10-11]。由于土壤元素的变异特征主要受地理距离、流域冲击及山地切割等影响,实质上不会因简单行政区划范围而发生跳跃式地变异,因此,从土壤元素地理分异特征上寻找到药材道地产区自然边界可能是准确把握药材生态适宜优劣的关键,但这一研究还未见报道。

本研究以出产“菊花心”川芎的传统道地产区都江堰市石羊镇及其沿同经度向南设计的160 km样带为研究区域,基本覆盖有川芎栽种历史或目前仍在栽培的地区。通过考察顺岷江流域效应,分析传统道地产区与同经度向南扩展区域川芎栽种前耕层土壤中24种元素及川芎“特征”元素的分布及变化特征,为道地川芎药材产区边界的客观认识及有序、安全、有效的进行川芎药材生产,确立药材“道地”地理标识提供科学依据和研究参考。

1 材料

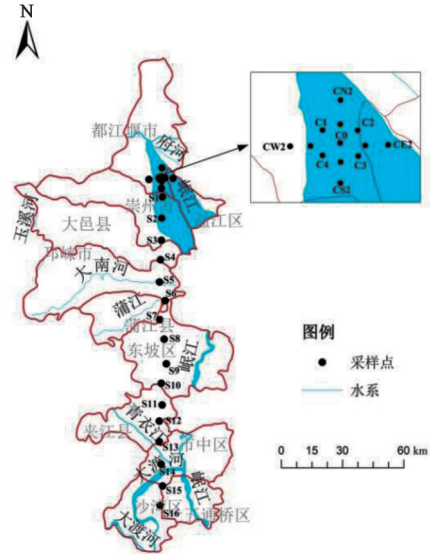
AXS S8 TIGER型波长色散型X射线荧光光谱仪(XRF,德国Bruker公司);Nex10N 350x型电感耦合等离子体发射光谱质谱仪(美国Perkin Elmer公司);Varian 720-ES型等离子发射光谱仪(美国Agilent Technologies公司);Mar s6 Xpress型高处理量高压微波消解器(美国CEM公司);AE240型1/1万电子分析天平(瑞士Mettler-Toledo公司);A5-40T型自动粉末压片机(绍兴东晶机械仪器设备有限公司);A5-04ZT型振动磨(绍兴东晶机械仪器设备有限公司)。

土壤标准物质(GBW07404~GBW07407, GBW07423~GBW07429, GBW07447~GBW074

48, GBW07454), 水系沉积物标准物质(GBW07301, GBW07302~GBW073012)及芹菜标准物质(GBW10048)均购于中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。多元素混合对照溶液(100 mg·L⁻¹, 批号 GSB04-1767-2004)及 K(批号 GSB04-1733-2004), Na(批号 GSB04-1738-2004), Ca(批号 GSB04-1720-2004), Mg(批号 GSB04-1735-2004), P(批号 GSB04-1741-2004), Zr(批号 GSB04-1762-2004), Rb(批号 GSB04-2836-2011), Y(批号 GSB04-1788-2004), Ce(批号 GSB04-1775-2004)单元元素对照溶液(1 000 mg·L⁻¹)均购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。HNO₃(优级纯, 德国 CNW 公司)。

参照土壤环境检测技术规范^[12], 于2017年8~9月在都江堰石羊镇及以南同经度扩展区域每10 km 等距采集前茬作物为水稻的川芎栽培前耕层(5~20 cm)土壤(以C0为起点: 北纬30°50', 东经103°40'), 共计26个采样地, 见图1, 表1。次年5月, 根据川芎栽培实际情况, 定点采集川芎植物样本及相应根际土壤样本共16批。土壤样本去除杂草、草

根、砾石等杂物后, 风干, 保存; 川芎植物样本按根茎部、须根部、地上部分割, 各部位分别用自来水洗净3次, 去离子水洗净3次, 烘干至恒重保存备用。



若预设样地无水稻田, 则在方圆1 km²内平移重设样地; C2, CE2, S7 无水稻田可作为川芎前茬用地, 遂放弃采样

图1 土壤样品采集样地

Fig. 1 Map of sampling plots

表1 样地信息

Table 1 Detailed Information of soil samples

样地编号	采集位置	采集数/个
C0, C1, C3, C4, CS1, CS2, CE1, CW1, CW2, CN1, CN2	都江堰市石羊镇	11
S1~S3	成都市崇州市	3
S4	成都市大邑县	1
S5~S6	成都市邛崃市	2
S8~S9	眉山市东坡区	2
S10~S13	乐山市夹江县	4
S14~S15	乐山市市中区	2
S16	乐山市沙湾区	1

2 方法与结果

2.1 样品处理

2.1.1 土壤样本处理 取适量风干土样研磨粉碎至200目以下, 在105℃下干燥2h后, 置干燥器内冷至室温。将PVC塑料环置于压样模具, 取已烘干样品约4.5g, 精密称定, 置于环中, 加压300 kPa保持20s, 制成直径为34 mm的样片, 编号, 放入干燥器中保存, 待测。每个样品1式3份, 重复测量3次。

2.1.2 植物样本处理 精密称取川芎植物各部位粉末0.5g(过60目筛), 置于微波消解管中, 加入浓硝酸溶液6 mL, 密闭罐盖, 放置过夜。移入微波消

解系统中升温20 min至190℃, 保持25 min, 冷却后取出。缓慢打开罐盖, 将消解液转移至25 mL量瓶中, 用超纯水定容备用。同时做空白对照。

2.2 测定条件 参考文献^[13]方法, 略加改进, 确定了XRF工作参数, 见表2。ICP-MS的工作参数设置, RF功率1.0 kW; 等离子体气流速18.0 L·min⁻¹; 辅助气流量1.2 L·min⁻¹; 雾化器流量0.81 L·min⁻¹; 冷却水温度20℃; 泵速5 r·min⁻¹; 采样锥类型Ni锥; 分析模式定量; 测定方式KED模式(内标元素In 115); 重复数3次。ICP-OES测定Na, Mg, Al, K, Ca, P和Zn元素含量。工作参数, RF功率1.0 kW;

等离子体气流速 15.0 L·min⁻¹; 辅助气流量为 1.5 L·min⁻¹; 雾化器流量 0.75 L·min⁻¹; 冷却水温度 26 °C; 泵速 15 r·min⁻¹; 进样延迟时间 20 s; 读数次数 3; 分析模式定量; 校正模式标准。

表2 XRF的工作参数

Table2 Measurement conditions for elements by XRF

分析元素	分析谱线	电压/kV	电流/mA	分光晶体	峰位 2θ/(°)	检测器
Na, Mg	Kα1	30	33	XS-55	20.656 ~ 24.868	流光检测器
Al, P	Kα1	30	33	PET	89.412 ~ 144.581	流光检测器
K, Ca, Ti, V, Ce	Kα1	50	20	LIF200	76.957 ~ 136.665	流光检测器
Mn, Zr, Rb, Sr, Y, Co, Ga, Cr, As, Ni, Cu, Zn, Pb	Kα1	50	20	LIF200	22.529 ~ 69.361	闪烁检测器
Ba	Lα1	50	20	LIF200	87.168	流光检测器
Fe	Kα1	50	5	LIF200	57.524	闪烁检测器

2.3 精密度和准确性考察 取土壤标准物质 GBW07454 和芹菜标准物质, 按照 2.1 项下方法制

备 10 份供试品, 分别考察已建立土壤及植物方法的精密度和准确度, 见表 3。各组分 RSD 均 < 10%。

表3 标准物质精密度与准确性($\bar{x} \pm s$)

Table3 Precision and accuracy test of reference material($\bar{x} \pm s$)

mg·kg⁻¹

元素	标准值		测量值		精密度		元素	标准值		测量值		精密度	
	土壤	芹菜	土壤	芹菜	土壤	芹菜		土壤	芹菜	土壤	芹菜	土壤	芹菜
Na ¹⁾	1.29±0.02	2.17±0.23	1.42	2.01	0.22	2.60	Rb	950.00±20.00	18.5±1.2	96.73	16.65	1.22	2.65
Mg ¹⁾	1.19±0.03	0.53±0.03	1.06	0.50	0.50	2.70	Sr	192.00±6.00	213.00±19.00	196.40	211.83	0.41	3.41
Al ¹⁾	6.23±0.07	0.14	5.72	0.10	0.22	4.99	Y	27.00±2.00	0.35±0.08	27.09	0.22	2.14	2.60
K ¹⁾	1.89±0.02	2.70±0.20	1.79	2.88	0.18	2.24	Ce	71.00±3.00	1.04±0.11	70.82	0.88	7.37	5.83
Ca ¹⁾	5.13±0.07	1.66±0.06	4.99	1.90	0.20	2.94	Co	12.00±0.50	0.25±0.02	11.53	0.17	8.27	5.73
Fe	3.01±0.05 ¹⁾	597.00±34.00	3.15	573.27	0.21	5.28	Ga	14.90±0.40	-	15.40	1.22	5.19	4.17
Ti	0.39±0.02 ¹⁾	45.00	0.39	12.67	0.35	5.29	Cr	66.00±4.00	1.35±0.22	69.06	1.02	2.48	5.10
P	857.00±39.00	0.35±0.01	796.10	0.34	0.90	2.51	As	12.90±0.50	0.39±0.08	12.37	0.30	4.75	5.72
V	77.00±4.00	1.30±0.30	82.40	0.92	3.24	5.38	Ni	30.00±1.00	1.80±0.40	31.30	1.33	2.64	5.52
Mn	632.00±21.00	45.00±2.00	652.63	44.62	4.74	2.07	Cu	23.60±1.00	8.20±0.40	23.28	8.52	2.67	2.02
Zr	254.00±15.00	-	259.33	0.48	0.19	9.20	Zn	66.00±2.00	26.00±2.00	65.27	23.00	4.41	5.88
Ba	495.00±16.00	17.30±2.30	498.39	15.20	1.76	2.96	Pb	22.00±1.00	2.70±0.70	19.66	2.20	8.20	4.72

注: ¹⁾单位是%。

2.4 传统道地产区耕层土壤元素的分布特征 川芎传统道地产区呈现冲积潮土(类白膳泥)的小流域土壤特性^[14], 土壤样本中 24 种元素的含量见表 4, 5。在相同环境背景和长期的“水稻-川芎”轮作方式下, 各样地间多数元素含量趋于“均一化”^[15], 尤其是 Fe, Ti, Zr, Y, Ce, Ni 等元素 (RSD < 5%)。与中国土壤(A 层)化学元素背景值^[16]比较, 发现产区土壤的 Mg, Al, K, Fe, V, Ba, Co, Cr, Ni, Cu, Zn 11 种元素的均值明显高于背景值, 这些元素的富集多与人为干预及物源主体为岩浆岩^[17]有关, 其中 Mg, K, Fe, Cu, Zn 元素为作物的营养组分, 它们的相对富足表明了农田养分充足。Na, Zr, Rb, Sr, Y, Ce, Ga, Pb 9

种元素与背景值基本持平; Ca, Mn 和 As 含量低于背景值, 尤其 Mn 含量仅为都江堰土壤 Mn 元素基准值^[18]的 1/2。道地产区农业生产活动中磷肥供应充足, 全 P 含量基本接近我国土壤整体水平的上限值 1 100 mg·kg⁻¹。

此外, Ca, As 元素含量在土壤样本中变异性大 (RSD > 35%)^[19], 究其原因主要是样地 CE1, CN2 中 Ca, As 含量异常导致, 分析发现这两个样地的 Ca, Na, Mg, P, Mn, Co, Sr 元素的含量明显高于平均值, 而 As, Zn, Rb, Pb 显著低于平均值。由于地方经济模式的改变, CE1, CN2 样地以种植苗木为主, 为满足栽种需求, 可能对土壤结构造成了破坏。因此,

表4 传统道地产区耕层土壤元素质量分数

Table4 Concentrations of inorganic elements in the soil of traditional geo-authentic areas													mg·kg ⁻¹
样品	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Ti	P	V	Mn	Zr	Ba	
C0	9 322.22	10 766.67	88 433.33	23 000.00	6 033.33	37 844.44	4 632.99	1 013.67	119.26	309.70	244.44	615.18	
C1	10 388.89	12 288.89	87 533.33	24 300.00	7 833.33	39 166.67	4 495.10	1 372.11	121.00	344.71	237.46	625.41	
C3	10 388.89	11 944.44	89 088.89	25 333.33	7 211.11	39 233.33	4 482.67	1 061.67	128.81	292.61	214.60	648.84	
C4	9 366.67	11 988.89	91 500.00	25 344.44	8 100.00	40 533.33	4 648.50	1 073.00	129.52	359.70	229.13	668.43	
CE1	11 366.67	13 788.89	79 477.78	22 388.89	18 711.11	38 066.67	4 520.72	1 397.00	112.78	416.83	244.91	557.70	
CS1	9 900.00	11 388.89	88 388.89	24 811.11	6 033.33	40 488.89	4 546.82	1 042.78	125.28	291.34	228.48	638.47	
CS2	10 688.89	12 188.89	87 522.22	25 366.67	7 622.22	40 566.67	4 408.42	1 196.56	123.14	365.28	234.29	632.90	
CW1	9 811.11	11 322.22	87 800.00	23 433.33	7 611.11	39 255.56	4 609.97	1 014.33	123.12	370.63	234.66	621.77	
CW2	9 511.11	11 788.89	85 733.33	23 000.00	7 500.00	37 366.67	4 666.09	800.89	120.69	308.53	236.59	592.57	
CN1	10 088.89	11 922.22	91 266.67	26 688.89	6 444.44	40 122.22	4 508.90	975.22	131.97	279.43	214.04	682.31	
CN2	13 055.56	13 844.44	77 833.33	21 588.89	19 444.44	37 200.00	4 413.21	1 427.44	107.93	447.42	239.31	547.08	
背景值*	10 200.00	7 800.00	66 200.00	18 600.00	15 400.00	29 400.00	3 800.00	-	82.40	583.00	256.00	469.00	
样品	Rb	Sr	Y	Ce	Co	Ga	Cr	As	Ni	Cu	Zn	Pb	
C0	124.16	155.69	29.57	75.59	26.02	20.79	87.20	7.02	37.78	36.54	94.59	39.23	
C1	119.79	178.87	30.70	73.17	26.07	20.21	89.28	5.16	41.04	36.54	103.09	33.33	
C3	132.80	165.00	29.10	77.11	27.38	21.83	91.43	5.91	39.63	41.17	113.13	40.63	
C4	133.79	171.89	31.12	75.02	23.26	21.84	95.46	5.80	41.57	38.61	114.84	36.51	
CE1	103.97	214.08	29.69	73.02	37.20	18.38	77.02	2.67	37.51	34.57	78.38	29.58	
CS1	128.53	163.14	29.40	73.24	22.98	20.62	89.96	8.21	37.34	34.31	99.66	34.37	
CS2	127.94	159.38	29.83	75.00	27.09	20.96	92.03	6.78	39.77	39.88	102.34	32.39	
CW1	122.89	169.66	30.46	79.63	26.20	20.32	90.41	5.37	37.86	33.14	97.50	35.68	
CW2	117.98	152.13	29.76	70.49	32.54	20.09	85.54	2.94	38.60	34.08	90.81	33.67	
CN1	141.81	164.57	29.42	76.79	25.40	22.31	97.70	6.24	40.76	37.79	115.03	39.79	
CN2	98.16	230.83	29.56	69.37	38.56	17.93	86.18	1.48	36.20	30.54	62.90	25.44	
背景值*	111.00	167.00	22.90	68.40	12.70	17.50	61.00	11.20	26.90	22.60	74.20	26.00	

注:变异系数(%),“*”表示中国土壤(A层)化学元素背景值的算术均值。

考虑到数据分析与实际情况相契合,CE1,CN2在道地产区分析中作异常样地处理,以使结果更具真实性。

2.5 沿经度向南扩展区域耕层土壤元素的分布特征 扩展区域处于平坝和丘陵地区,土壤类型主要包括潮土,黄壤和紫色土。区域内土壤元素分布的离散度高,见表5。部分元素含量整体表现出一定程度的连续变化规律,如Na,K,Ca,Fe,Ni,Zn,Ga,Rb,Sr,Ba元素含量沿经度呈下降趋势,其中,Na,Rb,Sr,Ba元素趋势明显;Ti,Zr元素含量沿经度有较缓的增加趋势。与中国土壤(A层)化学元素背景值^[16]比较结果显示,扩展区内Ti,V,Cr,Co,Cu,Y,Pb,Ce元素含量明显高于背景值,Na,Ca,Mn,As,Sr元素含量较背景值偏低。根据单样地分析结果发现,剩余元素含量特征明显分层,S1~S6,S14~

S16样地中元素含量丰富,基本都高于背景值,S8~S13样地表现出相反的特征。此外,个别样地土壤元素含量呈现区域离群状态,S9和S13样地的Zn,As元素缺乏现象突出;S14样地土壤元素存在富集;尤其Mg,Fe,Ti,Cr,Mn,Cu等元素含量超过其余各样地土壤丰度。见图2。

2.6 川芎与根际土壤中无机元素含量相关性分析 将川芎植株各部位与根际土壤中元素含量作线性回归分析,Spearman相关系数检验元素间的相关性,见图3。川芎中多数元素含量与其根际土壤中对元素含量相关性并不显著,仅K,Mg,Mn,Rb元素含量具有明显相关性(置信区间:95%,R²>0.5)。其中,Mg元素在根茎与土壤间表现出显著正相关;Mn元素在地上部分、须根与土壤间呈显著负相关;K,Rb元素在须根与土壤间表现出正相关性。

表5 传统道地产区及沿经度向南扩展区域耕层土壤元素特征

Table 5 Characteristics of inorganic elements in soil of the research areas

元素	最小值/mg·kg ⁻¹		最大值/mg·kg ⁻¹		均值/mg·kg ⁻¹		变异系数/%	
	道地产区	扩展区域	道地产区	扩展区域	道地产区	扩展区域	道地产区	扩展区域
Na	9 322.22	2 322.22	13 055.56	9 866.67	10 353.54	5 140.74	10.47	43.22
Mg	10 766.67	3 033.33	13 844.44	20 444.44	12 112.12	8 585.19	7.83	51.11
Al	77 833.33	58 366.67	91 266.67	90 466.67	86 779.80	74 413.33	5.02	12.45
K	21 588.89	11 300.00	26 688.89	25 411.11	24 114.14	17 537.04	6.43	22.33
Ca	6 033.33	1 800.00	19 444.44	19 911.11	9 322.22	6 374.07	52.31	80.48
Fe	37 200.00	23 077.78	40 566.67	54 188.89	39 076.77	34 871.85	3.29	24.16
Ti	4 408.42	4 198.89	4 666.09	10 870.36	4 539.40	5 724.77	1.99	28.06
P	800.89	425.33	1 427.44	1 461.22	1 124.97	812.81	17.72	31.84
V	107.93	73.88	131.97	180.82	122.14	110.97	5.84	22.45
Mn	279.43	191.64	447.42	1 042.98	344.20	400.78	15.76	59.97
Zr	214.04	216.26	244.44	392.99	232.54	294.12	4.47	17.07
Ba	547.08	345.97	682.31	645.79	620.97	430.12	6.75	17.85
Rb	98.16	72.97	141.81	135.53	122.89	98.06	10.41	19.09
Sr	152.13	62.64	230.83	166.93	175.02	94.42	14.21	28.63
Y	29.10	21.23	31.12	34.28	29.87	29.06	2.08	10.68
Ce	69.37	59.41	79.63	84.38	74.40	76.22	3.99	7.78
Co	22.98	10.37	38.56	49.17	28.43	26.43	18.66	45.13
Ga	17.93	12.4	22.31	22.10	20.48	17.51	6.65	15.57
Cr	77.02	54.92	97.70	155.42	89.29	85.56	6.15	29.28
As	1.48	0.00	8.21	13.93	5.23	8.54	39.23	44.83
Ni	36.20	21.56	41.57	51.50	38.91	32.18	4.49	26.44
Cu	30.54	22.71	41.17	76.61	36.11	33.35	8.71	38.61
Zn	62.90	4.20	115.03	113.42	97.48	73.93	16.31	39.75
Pb	25.44	23.56	40.63	50.31	34.60	35.12	13.12	20.04

2.7 样地聚类分析 将耕层土壤无机元素数据标准化处理后,利用 Bray-Curtis 相似性指数进行层次聚类分析,聚类结果显示 24 个样地共分为 2 类。其中,川芎传统道地产区样地与其临近的扩展区域为 S1~S6(除 S4 外)样地聚为一类,凸显了此区域内土壤元素含量特征的高度一致性。S4 样地土壤特征的偏离或因其处于居民区附近,人为干预强烈引起。此外,分析结果发现,离道地产区距离最远的 S14~S16 样地土壤特征较其余靠前样地(S7~S13)表现出了更好的相似性。为合理解释依据土壤元素特征筛选川芎道地产区边界的科学性,本研究将相关性分析中已获得的“川芎—土壤”关联元素作为“特征元素”,再次进行聚类分析,以验证研究区域土壤特征相似情况。川芎传统道地产区及其以南扩展区域土壤元素相似特性仍然表现出与上述分析基本一致的结果;并且,S14 和 S16 样地也被囊

括进高相似样地区。“特征元素”的聚类结果佐证了明晰土壤元素含量分布规律以界定川芎传统道地产区自然边界的重要性。见图 4。

3 讨论

土壤是有序、安全、有效发展中药农业生产的基础。随着农业技术的进步,地方经济驱动的调整和川芎药用市场的拓展等因素共同诱导,间接造成了川芎传统道地产区人为性的向外扩增,但扩增种植区的川芎生态适宜性还缺乏研究。研究区域土壤特征显示,因为传统道地产区位于岷江冲积扇扇顶,养分充足,Na, Mg, K 等营养元素丰富,但 Mn 含量相对缺乏。已有文献报道, K, Mg 是中药发挥活血疗效的重要成分之一,分别起着扩张血管,镇静、抵抗神经系统的作用,而在活血类药物中高 Mn(致血凝)含量则抑制活血疗效的发挥^[20-22]。因此,道地

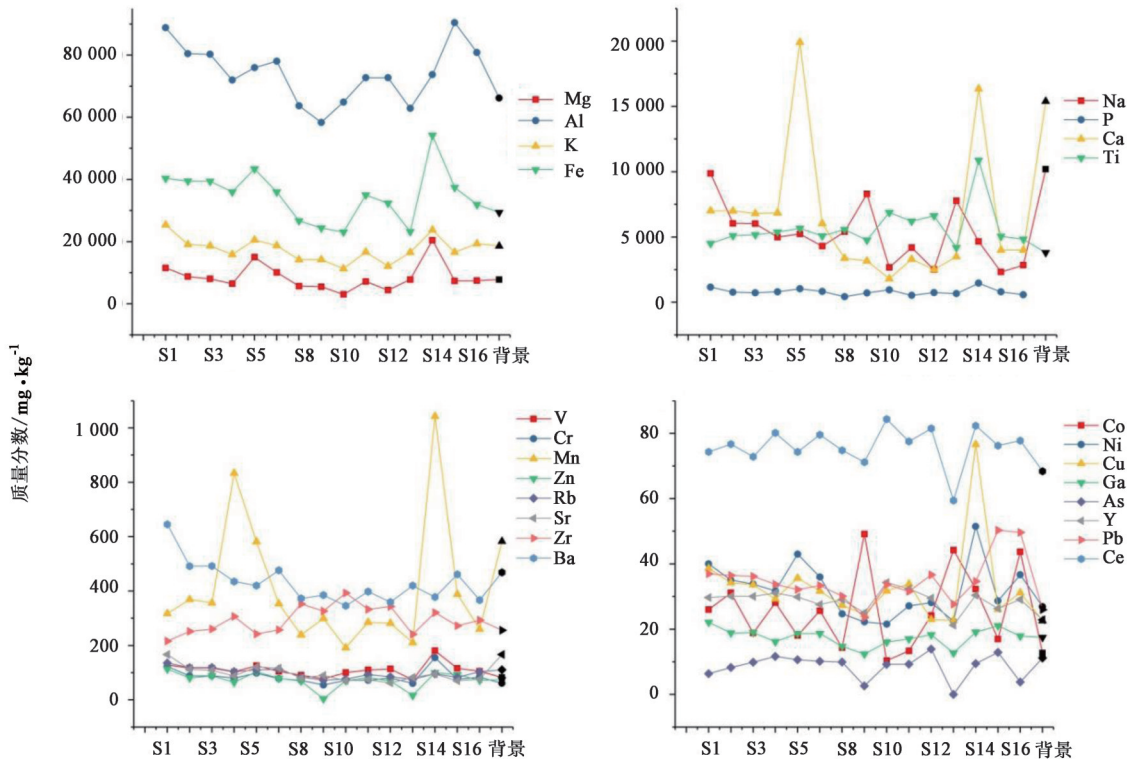


图2 沿经度向南扩展区域土壤特征分布

Fig. 2 Concentration distribution of studied soil elements in the extending areas along longitude

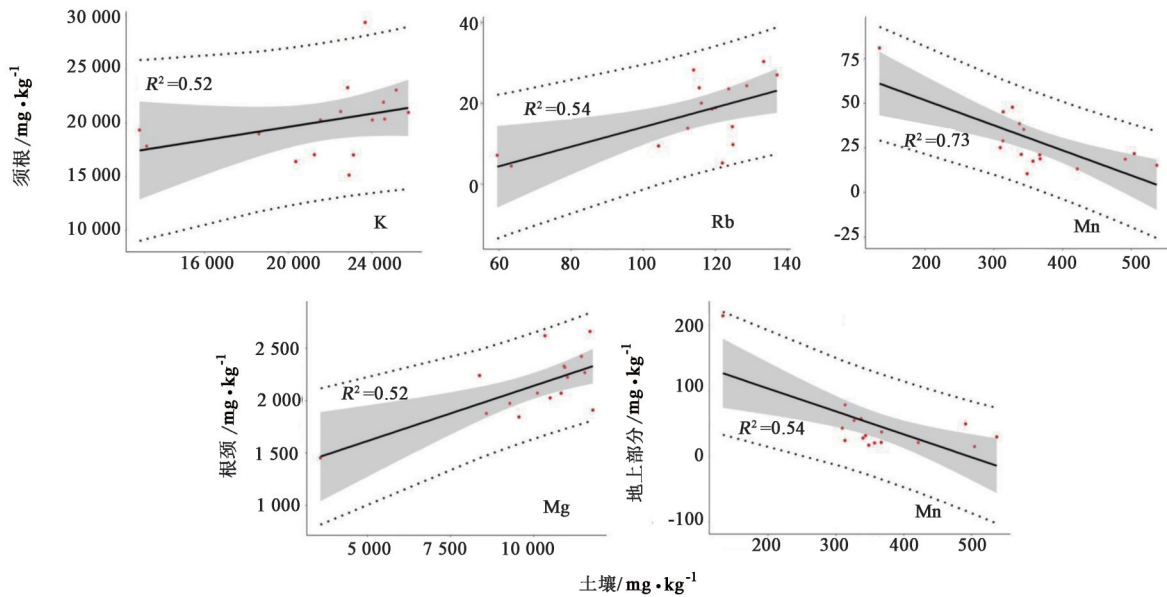


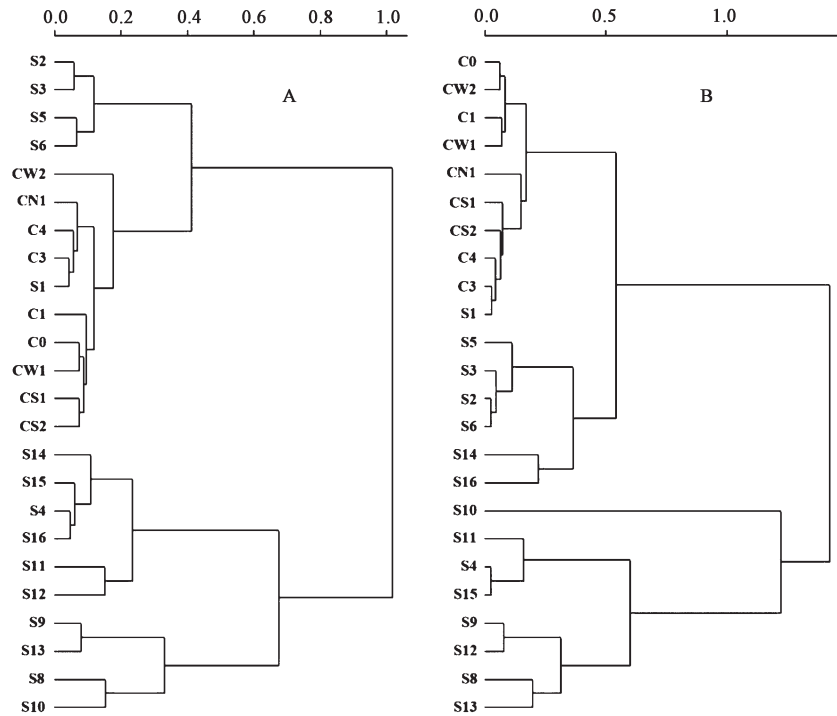
图3 川芎与根际土壤间无机元素的相关性分析

Fig. 3 Correlation of inorganic elements between the rhizosphere soil and *Ligusticum chuanxiong*

产区土壤中高K, Mg及低Mn含量特征, 或通过植物的选择性吸收和适应过程影响川芎元素含量分布, 进而可能形成川芎的“道地性”。

传统道地产区以南扩展区域的土壤元素含量特征分异明显, 尤其是横向通过的蒲江流域刚好将样带内土壤元素特征明显区分开。其北侧样地土壤元素特征与传统道地产区相近, 仅Na, K, Sr, Ba

元素含量较之略微偏低, 从土壤元素层面上, 能满足川芎高产优质的环境需求。扩展区域中部的蒲江—青衣江内样地受古河道侵蚀、阶地构造抬升等因素影响^[23], 表现出了土壤特征的高度异质性; 南端边缘样地(岷江、大渡河汇流处至大渡河下游区域)与川芎传统道地产区土壤特征相比, 变异幅度较扩展区域中部样地偏低。研究区土壤特征“断



a. 基于检测的全元素的样地聚类; b. 基于筛选出的特征元素的样地聚类

图4 川芎传统道地产区及沿经度向南扩张区域内样地聚类

Fig. 4 Hierarchical cluster analysis of 24 sampling plots based on the elements concentrations

层”现象揭示了元素变异性沿经度虽部分受地理距离控制,但流域侵蚀及山地抬升作用影响更加显著。因此,或提示眉山(S8~S9样地)作为现今川芎主产区之一,从土壤环境适宜性方面考虑还有待考究。本研究通过对土壤元素分布特征的综合分析发现,川芎传统道地产区及其扩展区域至邛崃境内土壤元素特征高度相似,提示川芎道地产区的自然边界或许可由传统都江堰产区向南延伸60 km,这一范围为最佳的川芎栽培生态适宜区。该研究结论为科学规划川芎栽培选地、稳定川芎种植规模和保证川芎品质等提供了参考依据。

由于土壤调查中,样本数量大,测量元素多,若采用ICP-OES,ICP-MS等技术进行土壤元素测量,势必耗时费力,增加检测成本。X射线荧光光谱法具有操作简便、可多元素同时测定、分析快、无污染、低成本等优点^[24],研究表明此法能满足中药种植业中土壤分析的要求,是中药种植区土壤筛选的一种快速、低成本分析方法。

重金属含量是评价药材安全性的指标之一,控制药材中重金属的含量要特别注重栽培地的选择。近些年,川芎药材Cd含量超标被广泛关注^[25-26],本研究中耕层土壤重金属含量均符合国家农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018),即Cr≤

300 mg·kg⁻¹, As≤25 mg·kg⁻¹, Ni≤100 mg·kg⁻¹, Cu≤100 mg·kg⁻¹, Zn≤250 mg·kg⁻¹, Pb≤140 mg·kg⁻¹。今后还将补充分析研究区域内Cd元素分布。此外,在后续研究中,还将综合考虑气候、土壤微生物、种质差异、栽培技术可实施性等因素影响,以期对川芎传统道地产区环境自然边界认识形成系统全面的理解。

[参考文献]

[1] 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,2015:40.
[2] 万德光,彭成,赵军宁,等. 四川道地中药材志[M]. 成都:四川科学技术出版社,2005:4.
[3] ZHANG X P, DENG W, YANG X M, et al. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China[J]. J Asian Earth Sci, 2002, 21(2):167-174.
[4] NICKLESS E M, ANDERSON C, HAMILTON G, et al. Soil influences on plant growth, floral density and nectar yield in three cultivars of mānuka (*Leptospermum scoparium*) [J]. New Zeal J Bot, 2017, 55(2):100-117.
[5] YE H C, SHEN C Y, HUANG Y F, et al. Spatial variability of available soil microelements in an

- ecological functional zone of Beijing [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(2): 13.
- [6] ADAMCZYKSZABELA D, MARKIEWICZ J, WOLF W M, et al. Heavy metal uptake by herbs. IV . Influence of soil pH on the content of heavy metals in *Valeriana officinalis* L. [J]. Water Air Soil Poll, 2015, 226(4): 106.
- [7] 周光姣,王超群,权春梅,等. 亳白芍药材质量与土壤中主要无机元素相关性[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(18): 76-80.
- [8] 杨月,陈艳姣,张爱琛,等. 土壤无机元素含量与三七药材品质的关系[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(13): 47-53.
- [9] 陈林,银玲,陈鸿平,等. 不同种植区土壤对川芎药材无机元素富集影响研究[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(8): 2004-2006.
- [10] 李新虎. 土壤地球化学环境对宁夏枸杞品质的制约影响研究[D]. 北京:中国地质大学, 2007.
- [11] LI L, ZHENG S H, YANG Q Z, et al. Distinguishing *Astragalus mongholicus* and its planting soil samples from different regions by ICP-AES [J]. Molecules, 2016, 21(4): 482.
- [12] 国家环境保护总局. HJ/T166-2004 中华人民共和国环境保护行业标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.
- [13] 环境保护部. HJ780-2015 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散X射线荧光光谱法[S]. 北京:中国环境出版社, 2015.
- [14] 范俊安,易尚平,张爱军,等. 川产道地药材受GBS制约效应[J]. 中国中药杂志, 1996, 21(1): 12-14.
- [15] 郝立波,马力,赵海滨. 岩石风化成土过程中元素均一化作用及机理:以大兴安岭北部火山岩区为例[J]. 地球化学, 2004, 33(2): 131-138.
- [16] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995: 28.
- [17] 何玉生,任利民,唐文春,等. 成都经济区浅层土壤地球化学特征的土壤分类学意义[J]. 地球化学, 2006, 35(3): 311-318.
- [18] 唐文春,金立新,周雪梅. 成都市土壤中元素地球化学基准值研究及其意义[J]. 物探与化探, 2005, 29(1): 71-83.
- [19] TEFSAHUNEGN G B, TAMENE L, VLEK P L G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia [J]. Soil Tillage Res, 2011, 117: 124-139.
- [20] 王晓东. 常用运动损伤中草药中镁含量的测定与研究[D]. 太原:山西大学, 2012.
- [21] 因杰秀. 归心经中草药中钾、钙、钠、镁含量测定与研究[D]. 太原:山西大学, 2010.
- [22] ASCHNER J L, ASCHNER M. Nutritional aspects of manganese homeostasis [J]. Mol Aspects Med, 2005, 26(4/5): 353-362.
- [23] 王继龙,吴中海,孙玉军,等. 青衣江河流沉积与阶地特征及其成因演化[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 642-658.
- [24] MBAYE M, TRAORE A, NDAO A S, et al. Multivariate statistical techniques to determine essential and toxic elements in biological samples by X-ray fluorescence [J]. Instrum Sci Technol, 2015, 43(3): 369-378.
- [25] 李晓念,陈幸,李彬. 川产道地药材川芎中重金属的来源途径研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19361-19363.
- [26] 唐文春,张秀芝,何玉生,等. 成都盆地平原区浅层土壤Cd、Pb、Zn分布特征及其成因初探[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 89-97.

[责任编辑 顾雪竹]