·中药农业·

川芎主产区土壤养分空间变异及丰缺评价△

彭芳[1]，吴宇[1]，陶珊[1]，袁灿[1]，施田田[1]，陈媛媛[2]，沙秀芬[3]，廖雪梅[2]，廖绪红[3]，李生翠[2]，张超[1*]

1. 四川省农业科学院 经济作物育种栽培研究所，四川　成都　610399；
2. 四川农业大学 水稻研究所，四川　成都　611130；
3. 四川师范大学 生命科学学院，四川　成都　610101

［摘要］　**目的：**评价川芎主产区土壤养分的空间变异与丰缺状况。**方法：**测定成都平原 33 个乡镇 173 个土壤样品 pH，凯氏定氮法测定全氮，钼锑抗比色法测定有效磷，火焰光度法测定速效钾，电感耦合等离子体发射光谱法测定有效铜、有效锌、有效锰、有效铁，分光光度法测定色度，采用地质统计学方法分析土壤养分的基本特征、空间分布规律和相关性。**结果：**川芎主产区有效锰和有效铁含量分布均呈现中等程度(25% < 块基比 < 75%)的空间自相关性，受土壤类型和人为活动共同影响，其高值区域分别分布在眉山东北部和彭州-什邡一带。川芎主产区土壤的酸碱度基本适宜(pH = 5.77)；全氮和有效磷含量丰富，平均值分别为 2.18 $g \cdot kg^{-1}$ 和 72.07 $mg \cdot kg^{-1}$。除邛崃和绵竹外，川芎其他产区的速效钾均存在不同程度缺乏(< 100 $mg \cdot kg^{-1}$)，占总样品的 18.50%。除眉山外，川芎其他产区的有效锰均存在不同程度缺乏(< 5 $mg \cdot kg^{-1}$)，占总样品的 14.45%。有效铜、有效锌、有效铁的质量分数极高，平均值分别为 5.82、8.83、371.33 $mg \cdot kg^{-1}$。土壤色度 L 值与全氮、有效铁含量呈极显著正相关($P < 0.01$)，土壤色度 a、b 值与有效锰呈极显著正相关($P < 0.01$)，与有效磷呈极显著负相关($P < 0.01$)。**结论：**川芎主产区全氮、有效磷、有效铜、有效锌、有效铁含量丰富，而速效钾、有效锰存在不同程度缺乏。7 个营养元素的空间自相关性均较低，其质量分数的变异度较大，提示施肥等人为因素对川芎产地土壤养分影响较大。

［关键词］　川芎；土壤；养分；元素；空间变异；丰缺评价

［中图分类号］　R282.2　　［文献标识码］　A　　［文章编号］　1673-4890(2021)04-0666-08

doi：10.13313/j.issn.1673-4890.20200511008

Spatial Variation and Abundance Evaluation of Soil Nutrient in Soil of *Ligusticum chuanxiong* in Main Producing Regions

PENG Fang[1], WU Yu[1], TAO Shan[1], YUAN Can[1], SHI Tian-tian[1], CHEN Yuan-yuan[2], SHA Xiu-fen[3], LIAO Xue-mei[2], LIAO Xu-hong[3], LI Sheng-cui[2], ZHANG Chao[1*]

1. *Industrial Crops Research Institute*, *Sichuan Academy of Agricultural Sciences*, *Chengdu* 610399, *China*;
2. *Rice Research Institute*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*;
3. *College of Life Sciences*, *Sichuan Normal University*, *Chengdu* 610101, *China*

［**Abstract**］　**Objective**: To evaluate the spatial variation and abundance of soil nutrients in the main producing regions of *Ligusticum chuanxiong*. **Methods**: 173 soil samples from 33 villages and towns in the Chengdu plain were determined. The pH meter was used to measure pH value, Kjeldahl method for determination of the total nitrogen, molybdenum antimony anticolorimetric method for the available phosphorus, flame photometric method for the available potassium, ICP-OES were applied to determine the available copper, available zinc, available manganese, available iron, and spectrophotometric method to determine the color. The basic characteristics, spatial distribution, and correlation of soil parameters were analyzed. **Results**: The content distribution of available manganese and available iron showed a medium degree of spatial autocorrelation. They were influenced by both soil types and human activities, high value areas were respectively distributed in

△［基金项目］　国家中药材产业技术体系项目(CARS-21)；四川省科技厅重点研发项目(2019YFS0156)；四川省育种攻关项目(2021YFYZ0012)；现代农业学科建设推进工程项目(2021XKJS105)；成都农业科技中心地方财政专项(NASC2020AT01)

*［通信作者］　张超，研究员，研究方向：川产道地药材的育种栽培；Tel：(028)68907211，E-mail：jychaozhang@163.com

the northeast of Meishan and the Pengzhou-Shifang area. The pH of soil was basically suitable (pH = 5.77). The contents of total nitrogen and available phosphorus were abundant, with the average values of 2.18 $g \cdot kg^{-1}$ and 72.07 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Except Qionglai and Mianzhu, other producing areas had varying degrees of available potassium deficiency. The proportion of samples with available potassium content <100 $mg \cdot kg^{-1}$ was 18.50%. Except Meishan, there were different degrees of effective manganese deficiency in other producing areas, and the proportion of samples with effective manganese content <5 $mg \cdot kg^{-1}$ was 14.45%. Contents of available copper, available zinc, and available iron were extremely high, with average values of 5.82, 8.83, 371.33 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Soil color parameter L was positively correlated with total nitrogen and available iron content ($P < 0.01$), soil color parameters a and b were positively correlated with available manganese ($P < 0.01$), and were negatively correlated with available phosphorus ($P < 0.01$). **Conclusion**: The contents of total nitrogen, available phosphorus, available copper, available zinc, and available iron in the main producing areas of *L. chuanxiong* were abundant, while the contents of available potassium and available manganese were deficient to some degrees. The spatial autocorrelation of the seven nutrient elements was low, and the variation degree of their mass fractions was large, suggesting that human activities such as fertilization had a greater impact on soil nutrients of *L. chuanxiong*.

[**Keywords**]　*Ligusticum chuanxiong* Hort.; soil; nutrient; element; spatial variation; abundance evaluation

川芎是我国特大宗常用药材之一，具有活血行气、祛风止痛的功能。成都平原是川芎的主产区。四川省中医药管理局发布的《四川省中药材产业发展规划(2018—2025 年)》显示，川芎种植面积常年保持在 9 万亩(1 亩≈666.67 m^2)以上，年产量占全国总产量的 90% 以上。川芎传统种植习惯是施用猪粪水、草木灰等农家肥和油枯。近年来，川芎种植区内施用肥料种类极为单一，氮磷钾复合肥投入比例高(>90%)，每亩平均施肥量为 67 kg，且农户间用量差异大(每亩施用量为 5 ~ 113 kg)，极易导致土壤养分失衡，不利于川芎药材品质的稳定可控[1]。适宜的土壤 pH 和养分含量直接影响川芎的生长发育，进而影响川芎药材的产量及品质。因此，进行川芎土壤的营养诊断是实现科学精准施肥的关键。本研究在川芎主产区进行科学取样，利用地质统计学技术分析土壤 pH 和 7 个养分指标的空间变异规律，结合土壤外观色度进行相关性分析，了解川芎主产区土壤的元素丰缺状况及人为栽培管理活动对其影响，以期为川芎种植区的合理规划和平衡施肥等提供参考。

1　材料

1.1　试药

2018 年 4—8 月，参考目前各产区川芎的实际栽培面积，采用全球定位系统(GPS)开展川芎产区土壤定点取样工作，共取样 173 个(表 1)。选取农户种植面积在 1 亩以上的川芎田块进行土壤取样，用手持 GPS 测量田块中心的经纬度、海拔高度，取样方法根据田块形状不同而采取不同取样方法(5 点取样法或“W”形取样法)，每个田块至少取 5 点以上，取耕层土壤(0 ~ 20 cm)，用 4 分法取土样约 1 kg，经风干、研磨、过 100 目筛后制成待测土样。

表 1　川芎主产区土壤取样点

县级市、行政区	乡镇	样点/个
崇州市	白头镇、崇平镇、廖家镇、燎原乡	4
德阳市	黄许镇	2
都江堰市	柳街镇、石羊镇	14
广汉市	西高镇、新平镇	5
乐山市	乌抛乡、胜利镇	2
眉山市	凤鸣镇、复兴镇、公义镇、谢家镇、义和镇、永寿镇	15
绵竹市	新市镇	3
彭州市	敖平镇、葛仙山镇、红岩镇、军乐镇、濛阳镇、三界镇、升平镇	73
邛崃市	高埂镇、回龙镇、牟礼镇、泉水镇	9
什邡市	南泉镇、隐峰镇、元石镇	42
新都区	新繁镇	4

磷酸二氢钾、氯化钾均为基准试剂，购于天津科密欧化学试剂公司；铜、锌、锰、铁标准溶液(国家有色金属及电子材料分析测试中心)；土壤有效态 HTSB-5(标准物质，陕西省地质矿产实验研究所)；硫酸、高锰酸钾、盐酸、氨水、三乙醇胺、二乙烯三胺五乙酸、氟化铵、碳酸氢钠均为分析纯，购于成都市科隆化学品有限公司；氢氧化钠(分析纯，天津市大陆化学试剂厂)；硼酸(分析纯，天津市致远化学试剂有限公司)；钼酸铵、乙酸铵、酒石酸锑钾、2，4-二硝基酚均为分析纯，甲基红、溴甲酚绿均为指示剂，购于国药集团化学试剂有限公司；硝

酸(优级纯，成都金山化学试剂有限公司)；抗坏血酸(分析纯，北京索莱宝科技有限公司)；还原铁粉(分析纯，天津市鼎盛鑫化工有限公司)；二水合氯化钙(分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；水为经过和泰 smart-suvf 水处理系统处理后的去离子水。

1.2　仪器

雷磁 PHS-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)；XMTA-4T 型消化炉(上海乔跃电子有限公司)；K1100 型全自动凯氏定氮仪(海能未来技术集团股份有限公司)；Lambda25 型紫外-可见分光光度计(珀金埃尔默企业管理有限公司)；SAN + + 型连续流动分析仪(荷兰 SKALAR 分析仪器公司)；ICPE-9820 型电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津公司)；CM-700D 型手持分光测色计、CM-A184 型粉末测试装置(日本柯尼卡美能达公司)；ZD-85 型气浴恒温振荡器(江苏金坛市医疗仪器厂)；T-214 型分析天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司)；Avanti J-E 型多用途高效离心机(美国贝克曼库尔特有限公司)。

2　方法

2.1　研究区概况

研究区域位于四川省成都平原的 33 个乡镇 103 个村，属于亚热带湿润季风气候，全年平均气温 18 ℃，年平均降水量 > 1000 mm，川芎种植面积 >9 万亩。土壤类型主要为水稻土、紫色土，种植制度为水稻与川芎轮作，施肥以氮磷钾复合化肥为主。

2.2　样品测定

土壤 pH 采用玻璃电极法测定[2]；土壤全氮采用凯氏定氮法测定[3]；土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定[4]；土壤速效钾采用火焰光度法测定[5]；土壤中 4 种有效态元素铜、锌、锰、铁用二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法测定[6]。

土壤色度测定利用手持分光测色计进行[7]。测量方式为镜面反射光和漫反射光测量模式，照明光源 D65，视场选择 10°，孔径选择 8 mm 目标罩(含稳定片，CM-A178)。以 CIE($L^*a^*b^*$)颜色空间来定量描述土壤粉末颜色值。其中，L^* 轴代表明暗度，其值越大就感觉越白，其值越小就感觉越黑；a^* 轴代表红绿方向，$+a^*$ 为红方向，$-a^*$ 为绿方向；b^* 轴代表黄蓝方向，$+b^*$ 为黄方向，$-b^*$ 为蓝方向。

2.3　数据处理和分析

采用统计软件 SPSS 16 和 DPS 18.1 对土壤营养元素含量总体特征进行描述性统计分析，得出 $\bar{x}$、s、变异系数等信息。半方差函数的分析一般要求数据符合正态分布，否则可能会产生比例效应。因此，以($\bar{x} \pm 3s$)选出数据的异常值，若异常值 > (<)其他变量均值的 2 倍(1/3)，则剔除该值，反之，则用($\bar{x} \pm 3s$)来替换该值，再采用 K-S 方法对数据进行正态分布检验。对不符合正态分布的原始数据进行导数、对数和 Box-Cox 转化，将数据的分布类型转换为正态分布，满足半方差分析的要求。

采用地质统计学软件 GS +7.0 对经过异常值替换处理后的数据进行半方差函数分析和模型选择(主要包括球状、指数、高斯和线性模型)，随后，采用 ArcGIS 10.2 软件中普通克里格法对土壤营养元素含量进行基于区域化理论的多元回归分析，得到营养元素的空间变异图，将区域内的点信息转化为面信息。半方差函数主要模型的表达式如下。

球状模型：

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right) & 0 < h \leqslant a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (1)$$

指数模型：

$$\gamma(h) = C_0 + C_1(1 - e^{-\frac{h}{a}}) \quad h > 0 \quad (2)$$

高斯模型：

$$\gamma(h) = C_0 + C_1(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) \quad h > 0 \quad (3)$$

线性模型：

$$\gamma(h) = \begin{cases} \mathrm{A}h & 0 < h \leqslant a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (4)$$

上式中，h 表示采样点间距；C_0 为块金值，是由随机因素(耕作、施肥、管理水平等)引起的变异；C_1 是由结构性因素(母质、地形、气候等)引起的变异；C($C = C_0 + C_1$)为基台值，是半方差随间距递增到一定程度后出现的平稳值，即系统内的总变异；块基比 C_0/C 表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比例，即空间变异程度，块基比 <25% 表示系统具有强烈空间自相关，25% < 块基比 <75% 表示系统具有中等程度空间自相关，块基比 >75% 表

示系统空间相关性弱；A 为常数，表示直线的斜率；a 为变程，是土壤养分的空间相关性范围，$h \geqslant a$ 时，样品间是相互独立的，$h < a$ 时它们之间存在着一定的空间相关性。得到的块金值、基台值等用来定量描述区域化变量在一定尺度上的空间变异程度。

2.4　评价标准

土壤分级评价参考《四川土种志》的分级标准[8]，见表 2。

3　结果

3.1　川芎土壤主要养分的基本特征

川芎主产区土壤主要养分的基本特征见表 3。根据不同级别土壤养分评价标准，川芎主产区分别有 60.12% 土壤中全氮质量分数属于极丰富水平，77.46% 土壤中有效磷质量分数属于极丰富水平，两者均值分别为 2.18、72.07 mg·kg^{-1}，提示在川芎配方施肥时要适当控制外源氮和磷的加入量。速效钾质量分数均值为 182.54 mg·kg^{-1}，仍有 17.92% 的川芎主产区土壤速效钾缺乏，可见，川芎主产区土壤经过长期的耕作存在一定程度的钾元素缺失，这与周斯建[9]对彭州地区川芎土壤调查结果一致。同时，由于川芎本身对钾元素的需求较大[10]，配方施肥时应考虑适当加大钾肥的比例。川芎主产区 90% 以上土壤中有效铜、有效锌、有效铁含量都属于极丰富水平，三者质量分数均值分别为 5.82、8.83、371.33 mg·kg^{-1}，提示要注意重金属污染。有效锰质量分数均值为17.09 mg·kg^{-1}，有 45.09% 主产区土壤中有效锰属于适量水平，14.45% 有效锰含量缺乏，需要适量补充。

从变异程度上看，有效锌和有效锰表现为高等程度变异，变异系数分别为 139.50% 和 102.22%。其余指标均表现为中等程度变异，pH 的变异系数为 12.67%，速效钾的变异系数为 59.20%。pH、全氮、有效磷、有效铜、有效铁的峰度值接近 0，提示数据符合或接近正态分布。pH、全氮、有效铜、有效铁的偏度值接近 0，提示其频数分布较对称。

3.2　川芎土壤指标的空间变异特征

3.2.1　空间结构分析　如表 4 所示，土壤中的全氮服从正态分布，其他指标经过转化后均服从正态分布。所有指标的拟合系数均较低，其中，有效锰和有效铁的拟合系数分别为 0.71、0.62，具有一定的渐变性分布规律。空间相关性为 0.06 ~ 6.00 km，表明这些指标均在较小的空间范围内具有相关性。

表 2　不同级别土壤养分评价标准

级别	pH	质量分数						
		全氮/g·kg^{-1}	有效磷/mg·kg^{-1}	速效钾/mg·kg^{-1}	有效铁/mg·kg^{-1}	有效锰/mg·kg^{-1}	有效铜/mg·kg^{-1}	有效锌/mg·kg^{-1}
1	≤4.5	≥2.00	≥40	≥200	≥20.0	≥30.0	≥1.8	≥3.0
2	4.6 ~ 5.5	1.51 ~ 2.00	20 ~ 40	151 ~ 200	10.1 ~ 20.0	15.1 ~ 30.0	1.0 ~ 1.8	1.0 ~ 3.0
3	5.6 ~ 6.5	1.01 ~ 1.50	10 ~ 20	101 ~ 150	4.6 ~ 10.0	5.1 ~ 15.0	0.2 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0
4	6.6 ~ 7.5	0.76 ~ 1.00	5 ~ 10	51 ~ 100	2.6 ~ 4.5	1.1 ~ 5.0	0.1 ~ 0.2	0.3 ~ 0.5
5	7.6 ~ 8.5	0.51 ~ 0.75	3 ~ 5	31 ~ 50	≤2.5	≤1.0	≤0.1	≤0.3
6	8.6 ~ 9.0	≤0.50	≤3	≤30				

表 3　川芎主产区土壤指标特征（$n = 173$）

指标	($\bar{x} \pm s$)	变异系数/%	偏度	峰度	适宜程度等级分布/%				
					极丰富	丰富	适量	缺乏	很缺
pH	5.77 ± 0.73	12.67	0.96	0.78					
全氮质量分数	(2 180.02 ± 543.37) mg·kg^{-1}	24.93	0.45	0.03	60.12	31.79	7.51	0.58	0
有效磷质量分数	(72.07 ± 42.67) mg·kg^{-1}	59.20	1.02	1.07	77.46	14.45	6.94	0.58	0.58
速效钾质量分数	(182.54 ± 105.09) mg·kg^{-1}	57.57	1.97	5.87	31.79	20.81	28.90	17.92	0.58
有效铜质量分数	(5.82 ± 2.33) mg·kg^{-1}	40.00	0.88	0.99	99.42	0.58	0	0	0
有效锌质量分数	(8.83 ± 12.32) mg·kg^{-1}	139.50	6.84	61.82	91.33	8.09	0.58	0	0
有效锰质量分数	(17.09 ± 17.47) mg·kg^{-1}	102.22	4.07	27.70	14.45	26.01	45.09	14.45	0
有效铁质量分数	(371.33 ± 158.71) mg·kg^{-1}	42.74	−0.35	−0.29	99.42	0.58	0	0	0

表 4　川芎主产区土壤元素半方差函数模型参数

指标	理论模型	块金值	基台值	块基比/%	变程/km	决定系数	残差	分布类型
pH	球形	0	0	44.38	0.45	0.28	0	导数正态
全氮质量分数	指数	0.19	0.72	26.56	6.00	0.33	0.11	正态
有效磷质量分数	线性	0.28	0.77	36.60	0.93	0.48	0.17	对数正态
速效钾质量分数	指数	0.04	0.23	18.53	0.08	0.02	0.06	对数正态
有效铜质量分数	指数	0.01	0.02	45.68	3.04	0.31	0	Box-Cox 正态
有效锌质量分数	球形	0.01	0.18	2.95	0.06	0.04	0.04	Box-Cox 正态
有效锰质量分数	高斯	0.37	1.24	29.58	1.20	0.71	0.42	对数正态
有效铁质量分数	高斯	31 500.00	105 600.00	29.83	0.46	0.62	6 060 000 000.00	Box-Cox 正态

对半方差分析拟合结果较好的有效锰和有效铁采用普通克里格法进行插值分析，绘制其空间分布图(图 2)。川芎主产区土壤有效锰呈现不连续分布的特点，有效锰的最高值分布在眉山的东北部区域，其质量分数为 24.15 ~ 34.73 $mg \cdot kg^{-1}$；最低值呈零散斑块，分布在彭州、什邡和都江堰等区域，其质量分数为 6.02 ~ 13.08 $mg \cdot kg^{-1}$，整体而言，有效锰在川芎主产区的南部较为丰富，北部部分地区较为缺乏。川芎产区土壤有效铁质量分数分布比较复杂，最高值分布在彭州、什邡的条带状区域，高达 394.98 ~ 518.13 $mg \cdot kg^{-1}$，并以此为中心向外有效铁含量逐渐降低，最低值散布在都江堰、崇州、邛崃等区域。有效锰和有效铁含量分布均呈现出中等程度的空间自相关性，表明小区域的施肥等人为活动是影响土壤中有效锰和有效铁含量的一个重要因素。

3.2.2　川芎土壤 pH 和大量元素的空间分布　川芎各产区土壤酸碱度如表 5 和图 3 所示，pH 处于中性和微酸性是川芎最适宜的土壤，广汉和新都的土壤均在适宜 pH 范围内。其他产区土壤均存在不同程度的强酸性或微碱性。其中，强酸性土壤占比远高于微碱性土壤。老产区彭州土壤 pH 为 5.61，50.68% 呈强酸性；什邡土壤 pH 为 5.58，47.62% 呈强酸性。新产区眉山土壤 pH 为 6.05，33.33% 呈强酸性；邛崃土壤 pH 为 6.01，22.22% 呈强酸性。土壤酸度过大会加重川芎对重金属镉的吸收[11-12]。因此，

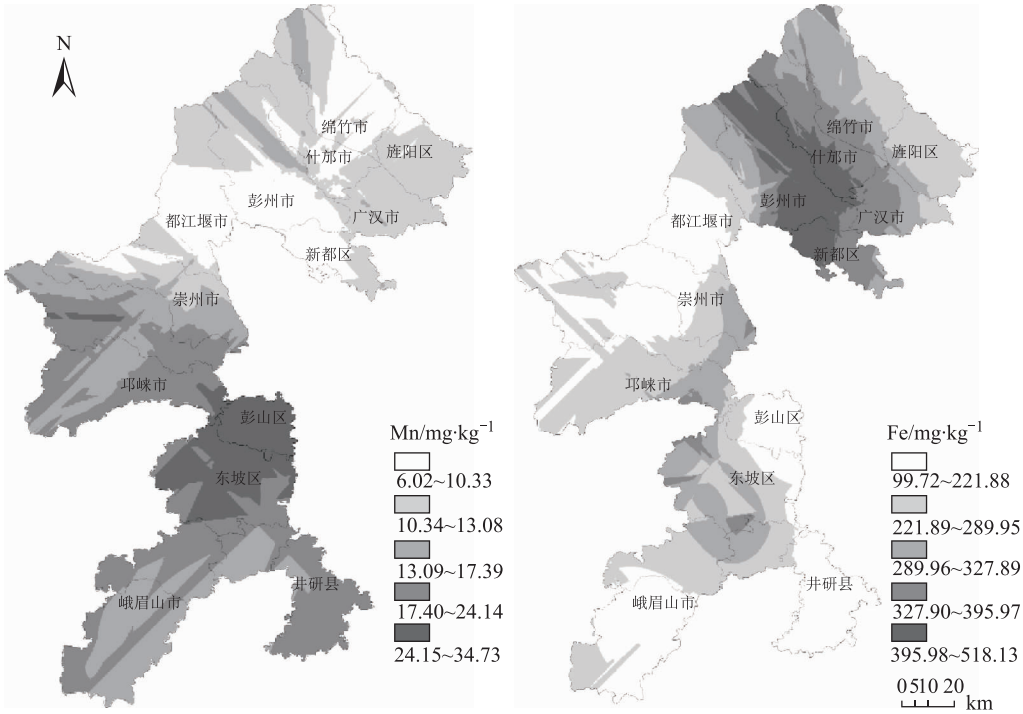

图 2　川芎主产区土壤锰和铁元素的空间分布

为保证川芎的安全生产，应在施用肥料和土壤调理剂等过程中适当提高土壤的 pH，更好地满足川芎生长需求。

川芎土壤全氮含量在县域之间差异明显（图 3、表 5）。眉山和邛崃的土壤全氮质量分数偏高，分别为 2.67、2.43 $g \cdot kg^{-1}$；德阳和广汉的土壤全氮质量分数相对偏低，分别为 1.43、1.90 $g \cdot kg^{-1}$；什邡的土壤全氮质量分数跨度最大，为 0.99 ~ 3.63 $g \cdot kg^{-1}$。所有产区的有效磷变异系数均较大，即土样间个体差异较大，推测其主要原因是芎农间施肥管理技术差异导致。都江堰和彭州的有效磷质量分数过高，40 $mg \cdot kg^{-1}$ 以上的土样占比分别高达 85.71%、89.04%；邛崃市的有效磷含量较低，66.67% 的土样磷质量分数 < 40 $mg \cdot kg^{-1}$。可见，川芎各产区的全氮和有效磷含量均处于偏高水平。因此，在施肥中应因地制宜控制氮和磷的施入量，提高肥料的利用率。川芎是典型的喜钾植物[13]，速效钾的供应情况直接影响着川芎药材的产量和品质。如图 3 和表 5 所示，速效钾在土样间的个体差异也较大，核心产区彭州和什邡的土壤速效钾质量分数分别为 62.98 ~ 505.66、60.15 ~ 382.12 $mg \cdot kg^{-1}$。除了邛崃和绵竹，其他市均存在不同程度的速效钾缺乏状态，彭州和什邡分别有 13.70%、21.43% 的土壤速效钾质量分数 < 100 $mg \cdot kg^{-1}$。都江堰有效钾缺乏比例则高达 35.71%。因此，考虑适量的施入钾肥是优质川芎生产的重要措施之一。

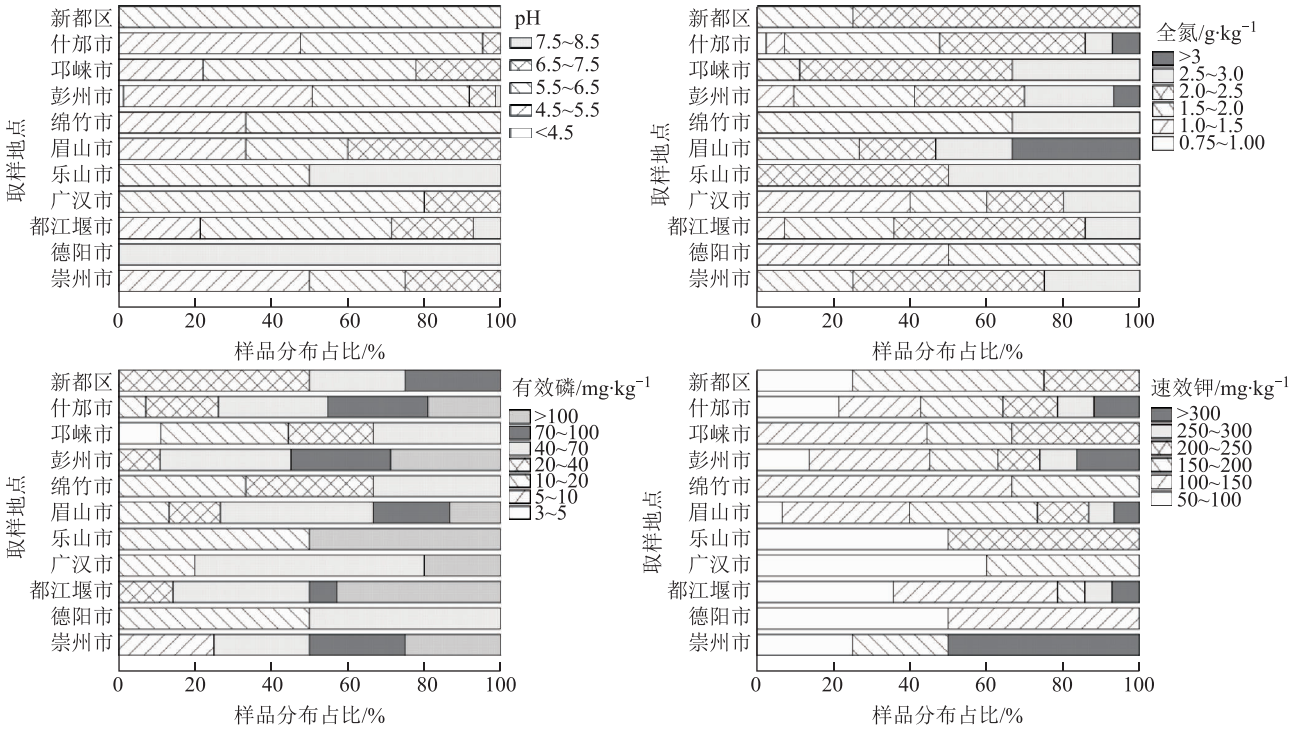

图 3　川芎主产区土壤样品 pH、全氮、有效磷、速效钾含量分布

表 5　川芎各产区土壤 pH 和营养元素质量分数（$\bar{x} \pm s$，$n = 173$）

取样地点	pH	全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	有效磷/ $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾/ $mg \cdot kg^{-1}$	有效铜/ $mg \cdot kg^{-1}$	有效锌/ $mg \cdot kg^{-1}$	有效锰/ $mg \cdot kg^{-1}$	有效铁/ $mg \cdot kg^{-1}$
崇州市	5.67 ± 0.83	2.22 ± 0.29	66.49 ± 46.18	217.62 ± 134.31	7.63 ± 2.18	7.37 ± 1.84	27.52 ± 16.3	265.28 ± 147.45
德阳市	7.68 ± 0.19	1.43 ± 0.42	34.35 ± 22.81	74.29 ± 52.49	3.91 ± 1.38	2.50 ± 0.70	16.20 ± 19.09	213.70 ± 262.05
都江堰市	6.26 ± 0.84	2.10 ± 0.34	88.85 ± 50.46	149.94 ± 140.46	7.75 ± 1.83	5.67 ± 3.41	11.61 ± 7.81	197.14 ± 114.28
广汉市	5.97 ± 0.40	1.90 ± 0.52	57.12 ± 35.53	117.05 ± 53.30	7.09 ± 2.24	6.02 ± 1.90	27.14 ± 30.36	372.40 ± 41.33
乐山市	7.02 ± 0.91	2.55 ± 0.15	85.48 ± 95.14	148.60 ± 91.10	9.04 ± 4.33	9.68 ± 8.10	26.00 ± 13.58	104.20 ± 63.36
眉山市	6.05 ± 0.81	2.67 ± 0.74	65.62 ± 49.67	200.41 ± 157.45	7.73 ± 1.27	5.93 ± 4.36	42.93 ± 37.09	231.51 ± 146.73
绵竹市	5.75 ± 0.49	2.04 ± 0.43	32.81 ± 26.62	153.58 ± 26.43	6.23 ± 1.63	24.77 ± 29.16	12.80 ± 7.50	307.67 ± 131.31
彭州市	5.61 ± 0.68	2.17 ± 0.53	82.98 ± 42.01	197.91 ± 106.22	4.89 ± 2.01	8.51 ± 6.34	13.25 ± 10.49	431.16 ± 149.17
邛崃市	6.01 ± 0.85	2.43 ± 0.44	32.13 ± 22.08	178.03 ± 40.79	7.34 ± 3.64	6.22 ± 7.09	27.15 ± 17.60	295.87 ± 152.15
什邡市	5.58 ± 0.53	2.06 ± 0.51	66.56 ± 35.43	177.37 ± 83.30	5.28 ± 1.89	12.12 ± 21.42	13.02 ± 7.22	419.07 ± 106.59
新都区	5.79 ± 0.31	2.13 ± 0.13	51.99 ± 18.78	153.21 ± 61.66	6.71 ± 0.80	3.79 ± 0.33	5.93 ± 1.25	446.75 ± 99.86

3.2.3　川芎土壤中微量元素的空间分布　从川芎土壤中微量元素含量空间分布结果分析(表 5、图 4)，四川川芎土壤有效铜锌锰铁的空间分布规律不明显，各等级穿插分布。川芎土壤有效铜质量分数偏高，最小值出现在彭州市，为 1.50 mg·kg^{-1}。其中，眉山、崇州、都江堰、绵竹、新都、乐山的所有土样有效铜质量分数均大于 5 mg·kg^{-1}。川芎土壤中有效锌和有效铁质量分数同样极度偏高且个体间差异大，有效锌最小值出现在邛崃市，为 0.85 mg·kg^{-1}。彭州和什邡分别有 43.84% 和 42.86% 的土样有效锌质量分数 >7 mg·kg^{-1}。除邛崃市外，其余产地的土壤中有效铁质量分数 >20 mg·kg^{-1}，其中什邡、新都和广汉的川芎所有土样中有效铁质量分数均大于 200 mg·kg^{-1}，彭州市也有 95% 的土壤样有效铁质量分数 >200 mg·kg^{-1}。

有效锰的分布在有些县域充足，有些县域缺乏。彭州、邛崃、什邡、都江堰、新都、德阳和绵竹都有缺乏，彭州和什邡的有效锰缺乏比例分别为 19.18% 和 11.90%。眉山的有效锰质量分数均值为 42.93 mg·kg^{-1}，所有样品均大于 5 mg·kg^{-1}。周斯建[9]研究发现，彭州的川芎土壤中锰缺乏，土壤中本身的锰元素含量较低是导致其有效态含量较低的重要原因，提示在施用微肥时可适当补充锰元素。

3.3　土壤指标之间的相关性

土壤粉末色度、pH 和主要营养成分指标相关性分析结果见表 6。有效铜、有效锌与土壤色度没有明显相关性。土壤 L 值与全氮、有效铁质量分数呈极显著正相关($P<0.01$)，土壤 a、b 值与有效锰呈极显著正相关($P<0.01$)，与有效磷呈极显著负相关($P<0.01$)，说明土壤越明亮，其土壤中全氮和有效铁的质量分数越高；土壤的颜色越靠近红色和黄色端，其锰的有效态质量分数增加，磷的有效态质量分数降低。提示通过对土壤的无损快速检测可以预测相关元素质量分数的高低。pH 与元素质量分数相关性分析显示，pH 越高，铁的有效态质量分数越低，表明川芎土壤从强酸—弱酸性—中性的转变会降低铁的有效态质量分数，从而减少金属元素铁的污染。大量元素与中微量元素相关性分析显示，全氮质量分数与有效铜质量分数呈极显著正相关($P<0.01$)，有效磷与速效钾呈现极显著正相关($P<0.01$)，速效钾与有效锰呈现极显著正相关($P<0.01$)。表明施氮肥可促进土壤中铜的有效态质量分数增加，施钾肥可促进土壤磷和锰的有效态质量分数增加。而有效锌和有效铁的质量分数受土壤氮、磷、钾养分的影响较小。

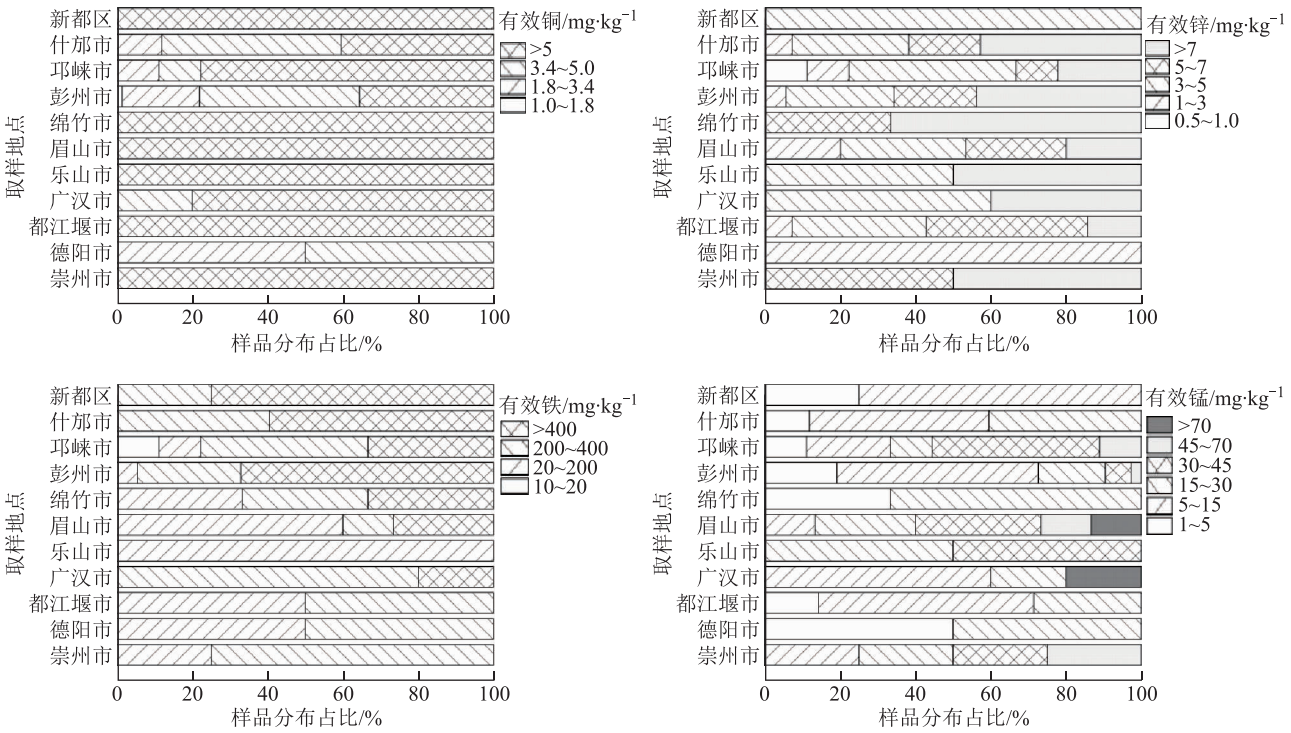

图 4　川芎主产区土壤中样品有效铜、有效锌、有效铁、有效锰含量分布

表 6　川芎主产区土壤各指标之间的相关性分析

指标	pH	土壤粉末 *L* 值	土壤粉末 *a* 值	土壤粉末 *b* 值	全氮质量分数	有效磷质量分数	速效钾质量分数	有效铜质量分数	有效锌质量分数	有效锰质量分数
土壤粉末 *L* 值	−0.321**									
土壤粉末 *a* 值	0.161*	0.002								
土壤粉末 *b* 值	−0.016	0.369**	0.811**							
全氮质量分数	−0.114	−0.242**	−0.018	−0.030						
有效磷质量分数	−0.172*	0.180*	−0.264**	−0.228**	0.108					
速效钾质量分数	−0.047	0.077	0.077	0.155*	0.098	0.356**				
有效铜质量分数	0.134	−0.074	−0.114	−0.122	0.272**	0.066	−0.093			
有效锌质量分数	−0.058	0.018	0.087	0.042	0.006	0.135	0.063	0.187*		
有效锰质量分数	0.087	0.037	0.382**	0.502**	0.191*	0.054	0.338**	0.282**	0.085	
有效铁质量分数	−0.767**	0.258**	−0.178*	−0.046	0.045	0.076	−0.081	−0.256**	0.004	−0.346**

注：* $P<0.05$；** $P<0.01$。

4　结论与讨论

土壤是川芎生长发育营养供给的主要来源，直接影响川芎质量形成。笔者通过对川芎主产区土壤养分测定发现，7 个营养元素（全氮、有效磷、速效钾、有效铜、有效锌、有效锰、有效铁）的空间自相关性均较低，说明其质量分数受土壤母质等结构性因素的影响较小，受施肥等人为因素的影响较大，这也与川芎栽培历史悠久，主产区耕作等农事活动频繁的现状相符。除全氮外，6 个元素质量分数的变异系数均大于 40%，提示芎农间的栽培管理水平参差不齐。除邛崃和绵竹外，其他川芎产区均存在不同程度的速效钾缺乏；除眉山外，其余川芎产区均存在不同程度的有效锰缺乏。其他 5 个元素质量分数在川芎主产区均为丰富：眉山和邛崃全氮为极其丰富，都江堰和彭州地区有效磷极其丰富。提示芎农在施肥中应控制氮磷肥的用量，可施入适量钾肥，同时由于速效钾与有效磷、有效锰均呈现极显著正相关（$P<0.01$），故钾肥的施入也能促进土壤中有效磷和有效锰的质量分数增加。另外，川芎主产区土壤酸碱度基本适宜（pH = 5.77），存在的主要问题是强酸性土壤占比较大，彭州等老产区的强酸性土壤分布比例明显高于眉山等新产区。因此，强酸性土壤的区域需采取一定措施提高土壤 pH 值，鉴于土壤 pH 与土壤中有效铁质量分数呈极显著负相关（$P<0.01$），提高 pH 能间接降低重金属铁的污染风险。因此，在后续川芎的施肥管理中需分县域进行精准的测土配方，同时，配合进一步规范化的川芎栽培管理措施，才能保证川芎药材质量的安全稳定。

参考文献

[1] 彭芳，陈媛媛，陶珊，等. 四川省川芎栽培现状调查与评价[J]. 中国实验方剂学杂志，2020，26(2)：181-189.

[2] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第 2 部分：土壤 pH 的测定：NY/T 1121.2—2006[S]. 北京：中国农业出版社，2006：1-3.

[3] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第 24 部分：土壤全氮的测定自动定氮仪法：NY/T 1121.24—2012[S]. 北京：中国农业出版社，2012：1-3.

[4] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第 7 部分：酸性土壤有效磷的测定：NY/T 1121.7—2006[S]. 北京：中国农业出版社，2006：1-3.

[5] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定：NY/T 889—2004[S]. 北京：中国农业出版社，2005：1-3.

[6] 中华人民共和国环境保护部. 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法：HJ 804—2016[S]. 北京：中国环境出版有限公司，2016：1-8.

[7] 董红梅. 陕西白水苹果园土壤元素分布与环境研究[D]. 西安：陕西师范大学，2014.

[8] 四川省农牧厅四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都：四川科学技术出版社，1994：758.

[9] 周斯建. 川芎岩石 土壤 植物元素迁移与富集研究[D]. 成都：成都理工大学，2014.

[10] 周利，赵曼茜，王升，等. 川芎中无机元素的分布及积累规律[J]. 中国中药杂志，2019，44(9)：1793-1798.

[11] 杨江，李彬，李青苗，等. 川芎镉含量与栽培土壤 pH 及镉活性态含量的相关性研究[J]. 中国农学通报，2014，30(7)：142-147.

[12] 李青苗，李彬，郭俊霞，等. 生石灰、硫磺对土壤 pH、川芎生长发育及药材中镉含量的影响[J]. 中药材，2016，39(1)：16-20.

[13] 陈兴福，丁德蓉，黄文秀，等. 川芎生长发育特性的研究[J]. 中国中药杂志，1997，22(9)：15-17，62.

（收稿日期：2020-05-11　　编辑：戴玮）