

钾肥种类及用量对滇重楼矿质元素积累和根际土壤养分含量的影响

许凌峰, 王 丹, 李卓蔚, 石汝杰*, 周 浓*

(重庆三峡学院生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆 404120)

摘 要: 分析氯化钾 (KCl) 和硫酸钾 (K_2SO_4) 两种钾肥及用量对滇重楼及根际土壤矿质元素积累的影响, 为滇重楼栽培中的钾肥选择及施用提供理论依据。采用盆栽试验, 以滇重楼不施钾肥为对照 (CK), 设氯化钾和硫酸钾配施比例分别为 100:0、75:25、50:50、25:75、0:100, 通过微波消解、原子荧光光谱 (AFS) 和电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的方法测定滇重楼根茎及根际土壤矿质元素。与 CK 相比, 施用 KCl 和 K_2SO_4 增加了滇重楼根茎部和根际土壤矿质元素的积累量, 并随施钾水平的提高而增加; 两种钾肥比例下滇重楼对矿质元素的积累普遍呈“升-降-升-升-升”的规律; 硫酸钾提高滇重楼根茎及根际土壤矿质元素含量幅度较氯化钾大。为降低滇重楼过量积累有毒有害矿质元素的风险, 种植滇重楼时钾肥的施用可按氯化钾和硫酸钾为 25:75 的比例配施。

关键词: 滇重楼; 硫酸钾; 氯化钾; 养分积累; 根际土壤

滇重楼 (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*) 是名贵的药用植物, 其干燥根茎具有止血、抗肿瘤、抗微生物和免疫调节等活性。我国西南地区是栽培滇重楼的主产区, 由于制药工业的需求量逐年增长, 野生滇重楼资源濒临枯竭, 其引种栽培受到人们的广泛重视, 重庆地区滇重楼面积逐年增加, 已成为当地独具特色的中药材生物资源和特色农业经济支柱产业^[1]。在长期的滇重楼栽培过程中, 逐渐出现了病虫害多发、产量降低和品质退化等现象, 科学合理的施肥管理是提高滇重楼产量和品质的重要途径^[2]。

钾肥是作物生产中常用的化肥, 钾素有“品质元素”之称, 是作物生长发育所必需的大量元素之一^[3], 具有促进光合作用, 增强抗病性和抗旱性的功能。生产中常用的钾肥品种有氯化钾和硫酸钾, 它们能提供植物生长所必需的钾元素、氯元素和硫元素^[4-5]。不同钾肥种类及用量对作物产量和品质的影响研究表明: 不同类型钾肥及用量对作物

产量及品质效果有明显差异, 硫酸钾提高产量和品质的效果优于氯化钾^[6-10]。关于不同钾肥种类及用量对滇重楼根茎及根际土壤矿质元素积累的研究还未见报道。为此, 本研究拟通过盆栽试验探明不同钾肥品种与用量对滇重楼养分吸收利用的影响, 为滇重楼栽培中钾肥品种选择及施用量提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在重庆市万州区铁峰山国家森林公园 (海拔高度 1350 m) 进行。供试土壤为未种植过滇重楼的砂质壤土, 其基本理化性状见表 1。

1.2 供试材料

供试滇重楼 (*P. polyphylla* var. *yunnanensis*) 新鲜根, 采集于贵州省安顺市滇重楼种植基地, 经重庆三峡学院周浓教授鉴定为延龄草科重楼属植物滇重楼。

1.3 试验设计

试验采用盆栽法, 栽培容器为直径 15 cm、深 18 cm 白色塑料花盆, 使用前用 75% 乙醇溶液擦拭, 每盆装土量控制在 6.0 kg, 设置 2 个钾肥品种: 硫酸钾 (K_2SO_4) 和氯化钾 (KCl), 试验共设 6 个处理, 不施钾肥的对照组 (CK); 处理组肥料用量总 N 量 0.15 g/kg、总 P_2O_5 量 0.12 g/kg、总 K_2O 量 0.30

收稿日期: 2022-03-01; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (cstc2018jcyjAX0267)。

作者简介: 许凌峰 (1996-), 硕士研究生, 主要从事药用植物栽培与应用研究, E-mail: xulingfeng953@126.com。

通讯作者: 石汝杰, E-mail: 281926472@qq.com; 周浓, E-mail: erhaizn@126.com。

表 1 试验地土壤理化性质

pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
6.72	21.20	1.83	0.32	28.83	10.64	104.66	328.64

g/kg, 总 K_2O 由硫酸钾和氯化钾提供; $KCl-K_2SO_4$ 比例分别为 100:0 (PE1)、75:25 (PE2)、50:50 (PE3)、25:75 (PE4)、0:100 (PE5)。每盆种植滇重楼 3 株, 3 次重复。

供试钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%) 和氯化钾 (K_2O 60%), 磷肥为磷酸二铵 (P_2O_5 17.8%), 氮肥为硝酸铵 (N 46.2%), 购自重庆多来利化肥有限公司。

栽培前采集土样做对照组 (CK), 收获各样品组, 置于恒温干燥箱 $45^\circ C$ 烘干至恒重, 粉碎, 过 0.178 mm 筛备用。收获药材的同时, 通过抖根法采集各样品组根际土壤, 风干、研磨, 过 0.178 mm 筛备用。

1.4 实验主要仪器

EXPEC 7000 型电感耦合等离子体质谱仪, 聚光科技 (杭州) 股份有限公司; Milli-Q Advantage A10 型超纯水机, 美国 Millipore 公司; SQP Sartorius 型万分之一电子天平, 德国 Sartorius 公司。

1.5 实验试剂

单元素标准溶液 1000 $\mu g/mL$: K (批号 GSB04-1733-2004)、Na (批号 GSB04-1738-2004)、Ca (批号 GSB04-1720-2004)、Mg (批号 GSB04-1735-2004)、Al (批号 GSB04-1713-2004)、P (批号 GSB04-1741-2004)、Fe (批号 GSB04-1726-2004)、Zn (批号 GSB04-1761-2004)、Se (批号 GSB04-1751-2004)、Cu (批号 GSB04-1725-2004)、Co (批号 GSB04-1722-2004)、Ba (批号 GSB04-1717-2004)、Mo (批号 GSB04-1737-2004)、B (批号 GSB04-1716-2004)、Ni (批号 GSB04-1740-2004)、Mn (批号 GSB04-1736-2004)、Cd (批号 GSB04-1721-2004)、Cr (批号 GSB04-1723-2004)、Pb (批号 GSB04-1742-2004)、As (批号 GSB04-1714-2004)、Hg (批号 GSB04-1729-2004), 均购自国家有色金属及电子材料分析测试中心; MOS 级浓硝酸 (北京化学试剂研究所); 实验用水为去离子超纯水; 其他试剂 (成都科龙试剂厂) 均为优级纯。实验所用容量瓶、移液管、烧杯等玻璃器皿均采用 10% 硝酸溶液浸泡 24 h, 然后用去离子超纯水冲洗干净, 备用。

1.6 测定方法

称取滇重楼样品或根际土 0.20 g 于聚四氟乙烯消解罐内, 加入浓硝酸 8 mL, 密封, 盖上消解盖, 静置过夜, 置于微波消解仪中, 按设定的消解程序进行: 先经 12 min 由室温升温 $150^\circ C$, 保持 10 min, 然后以 $8^\circ C/min$ 的速率升温 $190^\circ C$, 保持 20 min, 待消解完全后, 取出消解罐, 将消解液转移至 30 mL 容量瓶中并用去离子超纯水定容至刻度, 摇匀待测。取 8 mL 浓硝酸置于聚四氟乙烯消解罐内以相同的方法制备空白溶液^[9]。

ICP-MS 参数: 功率 1.4 kW, 雾化气流量 1.224 L/min, 辅助气流量 1.0 L/min、冷却气流量 14.0 L/min, 雾化室温度 $2.0^\circ C$, 蠕动泵速 30 r/min, 采样深度 3.91 mm, 扫描次数 10 次, 分析时间 26 s。AFS 参数: 汞灯, 负高压 290 V, 载气流量 400 mL/min, 屏蔽器流量 1000 L/min, 灯电流 10 mA, 重复次数 3 次, 读数时间 10 s。

1.7 统计分析

相关数据的统计分析采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 进行。

2 结果与分析

2.1 不同钾肥种类及用量对滇重楼 P、B 含量的影响

P、B 是植物生长所必需的两种矿质元素, 它们以磷酸盐、硼酸或硼酸盐、硅酸存在于土壤溶液中被植物吸收, 与植物体内醇类官能团发生酯化作用生成磷酸酯、硼酸酯等, 同时参与磷脂的代谢^[11-12]。不同钾肥品种及用量处理下, 滇重楼根茎 P、B 含量存在明显差异 (表 2)。与 CK 相比, 施钾处理均增加了滇重楼根茎 P 含量; 单一的硫酸钾处理 (PE5) 或氯化钾处理 (PE1) 下, 滇重楼根茎中 P 含量没有显著性差异, 但与两种钾肥同时施用相比, 差异显著; 两种钾肥同时施用下, 随着硫酸钾比例的提高, 滇重楼根茎中 P 含量增加, PE4 与 PE2、PE3 差异达到显著水平。与 CK 相比, 施钾处理均降低了滇重楼根茎 B 含量, 且差异显著, 单一的硫酸钾处理 (PE5) 或氯化钾处理 (PE1) 下, 滇重楼根茎中 B 含量平均降低了 44%, 两种钾肥同

时施用下, 滇重楼根茎中 B 含量呈“N”型变化, PE3、PE4 与 PE2 处理差异达到显著水平。

表 2 不同钾肥处理的滇重楼根茎 P、B 含量 (g/kg)		
处理	P	B
CK	2.049 ± 0.128d	0.099 ± 0.028a
PE1	14.75 ± 3.804a	0.050 ± 0.008b
PE2	5.082 ± 0.556cd	0.025 ± 0.002c
PE3	5.678 ± 0.127c	0.049 ± 0.014b
PE4	9.571 ± 0.803b	0.034 ± 0.018b
PE5	17.084 ± 1.311a	0.052 ± 0.031b
平均值	9.036	0.053
CV (%)	65.18	52.94

注：表中数据为平均值 ± 标准差 (n=3)，同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

2.2 不同钾肥种类及用量对滇重楼 K、Ca、Mg、Mn 含量的影响

K、Ca、Mg、Mn 是植物生长所必需的矿质营养元素，在土壤溶液中以离子形式被植物吸收，其主要功能是构成细胞渗透压、活化酶，成为酶和底物之间的桥梁^[13-16]。不同钾肥品种及用量处理下，滇重楼根茎 K、Ca、Mg、Mn 含量存在明显差异（表 3）。与 CK 相比，施钾处理均显著增加了滇重楼根茎 K、Ca、Mg、Mn 含量；4 种元素含量呈“升-降-升-升-升”的变化趋势；两种钾肥同时施用下，随着硫酸钾比例的提高，滇重楼根茎中 K、Ca、Mg、Mn 含量增加，其中各处理下的 Ca 元素含量均有显著差异，单施硫酸钾处理（PE5）下，滇重楼根茎中这 4 种矿质元素含量最高。

表 3 不同钾肥处理的滇重楼根茎 K、Ca、Mg、Mn 含量 (mg/kg)				
处理	K	Ca	Mg	Mn
CK	378.810 ± 17.677c	216.092 ± 26.440f	97.581 ± 13.448d	3.814 ± 5.400d
PE1	856.825 ± 80.673b	1446.905 ± 25.698e	446.431 ± 207.259b	16.796 ± 1.239b
PE2	491.873 ± 25.005c	753.098 ± 27.400e	185.078 ± 0.445cd	7.571 ± 0.210c
PE3	540.479 ± 45.321c	924.069 ± 74.336d	200.655 ± 17.470cd	7.845 ± 0.516c
PE4	847.754 ± 61.687b	1708.698 ± 69.175b	351.196 ± 33.619bc	14.120 ± 1.726b
PE5	1246.652 ± 256.078a	2286.009 ± 19.610a	639.211 ± 33.816a	24.306 ± 4.915a
平均值	727.065	1222.409	32.025	12.409
CV (%)	44.05	60.56	62.62	60.50

2.3 不同钾肥种类及用量对滇重楼 Fe、Cu、Zn、Mo 含量的影响

Fe、Cu、Zn、Mo 是植物生长所必需的微量矿质营养元素，它们以离子或螯合物存在于土壤溶液中被植物吸收，其主要功能是在植物体内以螯合态存在于辅酶中或通过原子价的变化传递电子^[17-20]。不同钾肥品种及用量处理下，滇重楼根茎 Fe、Cu、

Zn、Mo 含量存在明显差异（表 4）。与 CK 相比，施钾处理均显著增加了滇重楼根茎 Fe、Cu、Zn、Mo 含量，4 种元素含量呈“升-降-升-升-升”的变化趋势；两种钾肥同时施用下，随着硫酸钾比例提高，滇重楼根茎中 Fe、Cu、Zn、Mo 含量增加，单施硫酸钾处理（PE5）下，滇重楼根茎中这 4 种微量矿质元素含量达到最高。

表 4 不同钾肥处理的滇重楼根茎 Fe、Cu、Zn、Mo 含量 (mg/kg)				
处理	Fe	Cu	Zn	Mo
CK	13.236 ± 2.978e	3.688 ± 5.421c	25.168 ± 3.253e	0.740 ± 1.088c
PE1	112.043 ± 11.377b	18.209 ± 8.017ab	104.334 ± 1.560b	3.046 ± 1.555ab
PE2	45.017 ± 2.052d	8.265 ± 0.803cd	48.824 ± 1.846d	1.424 ± 1.417bc
PE3	44.531 ± 5.295d	8.039 ± 0.147cd	49.952 ± 12.131d	1.570 ± 0.542bc
PE4	82.578 ± 3.908c	14.325 ± 1.516bc	87.897 ± 9.150c	2.998 ± 0.116ab
PE5	147.351 ± 12.206a	25.949 ± 5.149a	155.425 ± 2.601a	4.784 ± 0.786a
平均值	74.126	13.079	78.600	2.427
CV (%)	66.92	62.14	60.25	60.68

2.4 不同钾肥种类及用量对滇重楼 Na、Al、Se、Co 含量的影响

Na、Al、Se、Co 虽不是植物生长所必需的矿质元素,但它们是某些植物特定生物反应所必需的,对植物的生长发育具有良好的刺激作用,或者对动物营养具有重要作用^[21-24]。不同钾肥品种及用量处理下,滇重楼根茎 Na、Al 含量存在明

显差异,Se、Co 含量没有差异(表5)。与 CK 相比,施钾处理均显著增加了滇重楼根茎 Na、Al 含量,呈“升-降-升-升-升”的变化趋势;两种钾肥同时施用下,随着硫酸钾比例提高,滇重楼根茎中 Na、Al 含量增加,单施硫酸钾处理(PE5)下,滇重楼根茎中这2种微量矿质元素含量达到最高。

表5 不同钾肥处理的滇重楼根茎 Na、Al、Se、Co 含量 (mg/kg)

处理	Na	Al	Se	Co
CK	995.812 ± 4.321c	23.675 ± 7.620c	0.006 ± 0.027a	0.758 ± 0.125a
PE1	4166.562 ± 75.520b	107.393 ± 8.396b	0.210 ± 0.112a	0.081 ± 0.039a
PE2	2232.000 ± 44.442c	40.645 ± 2.020c	1.118 ± 0.302a	0.024 ± 0.026a
PE3	2297.856 ± 97.351c	43.179 ± 9.597c	0.209 ± 0.020a	0.018 ± 0.015a
PE4	4269.415 ± 93.436b	90.654 ± 3.898b	1.209 ± 0.033a	0.045 ± 0.009a
PE5	6422.556 ± 8.452a	195.485 ± 3.890a	0.870 ± 0.652a	0.093 ± 0.049a
平均值	3397.367	83.505	0.044	0.758
CV (%)	57.13	76.12	63.03	79.23

2.5 不同钾肥种类及用量对滇重楼 Ba、As、Cr、Hg、Cd、Pb 含量的影响

Ba、As、Cr、Hg、Cd、Pb 是重金属和有害矿质元素,虽然有很多研究表明低剂量的重金属对药用植物的生长及品质具有促进作用,但重金属污染会对中药材产量、品质和商品价值造成不利影响^[25]。由表6可以看出,与 CK 相比,施钾处理均显著增加了滇重楼根茎 Ba、Cr、Pb 含量,且差异显著,单施硫酸钾处理(PE5)下,滇重楼根茎中

这3种微量矿质元素含量达到最高;不同钾肥处理下 As、Hg、Cd 含量与 CK 相比没有差异。对照《中华人民共和国药典(2020版)》《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》《中医药-中药材重金属限量》以及欧盟、美国、英国、德国、日本、新加坡、马来西亚和韩国等对中草药样品中重金属及有害元素含量的限量标准^[25],本试验种植滇重楼重金属含量均未超过上述限量标准,各重金属含量处在安全水平范围内。

表6 不同钾肥处理的滇重楼根茎 Ba、As、Cr、Hg、Cd、Pb 含量 (mg/kg)

处理	Ba	As	Cr	Hg	Cd	Pb
CK	0.441 ± 0.474c	0.438 ± 0.206a	0.460 ± 0.572bcd	0.082 ± 0.030a	0.047 ± 0.066a	0.302 ± 0.182b
PE1	4.643 ± 0.952b	0.729 ± 0.337a	1.823 ± 1.242ab	0.026 ± 0.011a	0.039 ± 0.010a	0.645 ± 0.349ab
PE2	1.823 ± 0.265c	0.501 ± 0.109a	0.076 ± 0.011d	0.073 ± 0.057a	0.015 ± 0.011a	0.306 ± 0.280b
PE3	2.254 ± 0.089c	0.535 ± 0.140a	0.452 ± 0.182cd	0.024 ± 0.005a	0.035 ± 0.018a	0.311 ± 0.093b
PE4	4.681 ± 0.394b	1.704 ± 2.699a	1.441 ± 0.219bc	0.157 ± 0.210a	0.045 ± 0.017a	0.545 ± 0.044ab
PE5	8.215 ± 2.121a	0.260 ± 0.065a	2.866 ± 0.852a	0.111 ± 0.087a	0.057 ± 0.034a	0.947 ± 0.184a
平均值	3.704	0.694	1.186	0.079	0.040	0.509
CV (%)	74.29	74.48	119.57	64.83	35.51	50.81

2.6 不同钾肥种类及用量对滇重楼根际土壤矿质元素含量的影响

由表7可以看出,与 CK 相比,除 Mo 元素外,施钾处理显著增加了滇重楼根际土壤其他各矿质元

素的含量,且差异显著($P < 0.05$)。不同钾肥种类及用量下,滇重楼根际土壤矿物质元素含量变化范围为 0.001 ~ 247.962 mg/kg,两种钾肥配施下滇重楼根际土壤 B、Na、As 3 种元素含量没有差异,

PE2 (KCl:K₂SO₄=75:25) 处理下 Ca、Mg 元素含量最高, PE3 (KCl:K₂SO₄=50:50) 处理下 Na、K、Al、Zn、Fe、Cu、Mn、Ba、Cr、Cd、Co、Se、Pb、

As 元素的含量最高。对比单施氯化钾 (PE1 处理) 与硫酸钾 (PE5 处理) 发现, 施用硫酸钾比施用氯化钾更能提高土壤矿质元素含量。

表 7 不同钾肥种类及用量对滇重楼根际土壤矿质元素含量的影响

元素	CK	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	CV (%)
	(mg/kg)						
B	17.774 ± 15.125b	389.942 ± 4.943a	309.046 ± 27.916a	365.092 ± 122.119a	329.218 ± 110.120a	372.753 ± 76.106a	47.129
Na	93.394 ± 5.064b	874.874 ± 147.729a	890.776 ± 20.783a	957.801 ± 37.474a	863.689 ± 0.034a	878.464 ± 45.913a	43.194
Mg	3681.376 ± 29.690e	14843.250 ± 435.868d	18839.802 ± 2833.51a	17452.382 ± 670.299b	15737.544 ± 0.604cd	16142.566 ± 980.827c	37.770
K	3121.303 ± 19.435e	15519.072 ± 307.740d	18028.848 ± 460.806b	19481.010 ± 819.314a	17566.8422 ± 0.739bc	16554.588 ± 1063.702cd	39.837
Al	26753.661 ± 435.767c	198174.087 ± 10217.280b	234567.197 ± 9932.287a	247962.199 ± 19047.022a	223597.892 ± 17175.497ab	204038.614 ± 19287.199ab	43.192
Ca	2466.769 ± 197.550c	8815.087 ± 1442.949b	13268.453 ± 2520.824a	10510.272 ± 2178.806ab	9477.552 ± 1964.720ab	9622.360 ± 2951.110ab	39.582
Cr	28.434 ± 0.277c	120.542 ± 6.716b	140.880 ± 6.016a	141.555 ± 6.769a	127.646 ± 6.104b	124.045 ± 6.592b	37.540
Mn	171.457 ± 1.621d	721.818 ± 32.837c	823.371 ± 14.23ab	85.600 ± 43.189a	768.825 ± 38.946bc	784.794 ± 47.576bc	37.345
Fe	22131.457 ± 284.711d	86744.603 ± 4146.682c	103521.700 ± 2637.208a	106985.200 ± 3692.385a	96473.050 ± 3329.578b	95858.989 ± 4851.536b	37.193
Co	5.557 ± 0.091e	22.901 ± 0.905d	25.992 ± 0.891ab	26.667 ± 0.543a	24.046 ± 0.490cd	24.888 ± 0.450bc	36.940
Cu	12.072 ± 0.220e	51.644 ± 0.908cd	54.296 ± 1.581c	66.251 ± 1.962c	59.741 ± 1.769b	50.955 ± 1.395d	38.760
Zn	97.593 ± 2.071e	443.068 ± 12.391d	523.895 ± 34.444b	531.253 ± 15.217a	479.053 ± 13.722cd	487.397 ± 23.067bc	38.532
As	14.009 ± 1.645b	57.892 ± 6.751a	68.314 ± 6.647a	73.621 ± 1.501a	66.387 ± 10.371a	63.783 ± 10.460a	38.107
Se	3.928 ± 2.132c	53.675 ± 36.006a	49.016 ± 27.195a	54.344 ± 3.471a	49.004 ± 3.130a	27.453 ± 18.350b	50.703
Mo	0.072 ± 0.018a	1.006 ± 0.062a	0.554 ± 0.179a	0.852 ± 0.169a	0.768 ± 0.153a	0.993 ± 0.149a	49.850
Cd	0.742 ± 0.064c	4.642 ± 0.234b	7.454 ± 0.314a	8.460 ± 0.556a	7.628 ± 0.501a	5.112 ± 1.155b	50.138
Ba	54.425 ± 1.228c	400.00 ± 27.669b	452.200 ± 23.205b	492.818 ± 30.312a	444.395 ± 27.334b	410.805 ± 48.978b	42.799
Hg	0.380 ± 0.121c	2.901 ± 0.318a	2.116 ± 0.228b	1.664 ± 0.317b	1.501 ± 0.286b	1.517 ± 0.174b	49.309
Pb	37.176 ± 0.227d	101.354 ± 3.475c	119.170 ± 1.420b	127.073 ± 2.998a	114.587 ± 2.135b	118.914 ± 5.759b	32.372

2.7 不同钾肥种类及用量下滇重楼及根际土壤矿质元素含量主成分分析

主成分分析是将众多的变量通过降维, 重新组合成为数不多的几个因子表示, 并且保证原始信息损失最小^[26]。运用 SPSS 20.0 分别对滇重楼药材和根际土壤进行主成分分析, 结果见表 8、表 9。由表 8 可知, 滇重楼根茎中矿质元素含量信息主要集中在前 4 个主成分, 累积贡献率高达 98.799%, 说明所提取的 4 个主成分能够较为全面地反映矿质元素的主要特征。其中, 主成分 1 的特征值为 13.301, 可以解释 66.507% 的原始数据变量信息, 除 Co、As、Se、Cd、Hg、Pb、Cr 外, 其他矿质元素的载荷值均大于 0.8, 说明这些元素对主成分 1 贡献较大; 主成分 2 的特征值为 3.496, 可以解释 17.482% 的原始数据变量信息, 对主成分 2 贡献最

大的是 Cr、Co 和 Cd; 主成分 3 的特征值为 1.763, 可以解释 8.815% 的原始数据变量信息, 各元素在主成分 3 中的载荷值比较低, 可做为前 2 个主成分变量信息的补充。由表 9 可知, 滇重楼根际土壤中的 19 种矿物质元素主成分构成信息主要集中在前 2 个主成分, 累积贡献率为 94.331%, 因此, 前 2 个主成分能反映滇重楼根际土壤 19 种矿物质元素含量的基本特征, 其中, 主成分 1 的特征值为 17.331, 可以解释 86.653% 的原始数据变量信息, 除 Mo、Hg 外, 其他矿质元素的载荷值均大于 0.8, 说明这些元素对主成分 1 贡献较大; 主成分 2 的特征值为 1.536, 可以解释 7.678% 的原始数据变量信息, 对主成分 2 贡献最大的是 Mo、Hg, 其他各元素在主成分 2 中的载荷值比较低, 可做为第 1 主成分变量信息的补充。

表 8 滇重楼根茎中矿质元素主成分的特征值及方差贡献率

种类	主要成分 1	主要成分 2	主要成分 3
B	0.868	-0.222	0.075
Na	0.983	0.072	-0.006
Mg	0.993	-0.038	0.111
Al	0.993	-0.067	-0.064
P	0.993	-0.022	0.112
K	0.991	-0.031	0.025
Ca	0.973	0.093	-0.084
Cr	0.094	0.964	-0.178
Mn	0.992	-0.051	0.007
Fe	0.989	-0.043	0.133
Co	0.535	0.715	-0.120
Cu	0.996	-0.059	0.053
Zn	0.991	-0.029	0.132
As	-0.701	-0.230	-0.663
Se	0.367	-0.752	0.017
Mo	0.814	-0.113	-0.527
Cd	-0.165	0.969	0.127
Ba	0.967	0.024	-0.170
Hg	0.012	0.379	0.734
Pb	-0.460	-0.513	0.578
特征值	13.301	3.496	1.763
贡献率 (%)	66.507	17.482	8.815
累积贡献率 (%)	66.507	83.989	92.804

表 9 滇重楼根际土壤中矿质元素主成分的特征值及方差贡献率

种类	主要成分 1	主要成分 2
B	0.938	0.159
Na	0.991	0.051
Mg	0.986	-0.041
Al	0.999	-0.031
K	0.998	-0.058
Ca	0.935	-0.052
Cr	0.998	-0.009
Mn	0.996	-0.042
Fe	0.996	-0.075
Co	0.994	-0.043
Cu	0.983	-0.029
Zn	0.996	-0.052
As	0.996	-0.089
Se	0.895	0.324
Mo	0.412	0.689
Cd	0.892	-0.164
Ba	0.999	-0.023
Hg	0.088	0.922
Pb	0.986	-0.145
特征值	17.331	1.536
贡献率 (%)	86.653	7.678
累积贡献率 (%)	86.653	94.331

3 结论与讨论

本研究采用电感耦合等离子体质谱法测定了不同钾肥种类及用量处理下的滇重楼根茎和根际土壤中 K、P、Mg、Ca、Fe、Cu、Zn、Mn、B、Ba、Cd、Pb、Mo、As、Co、Hg、Se、Mo 等矿质元素含量, 试验研究结果表明, 施用钾肥有利于滇重楼根茎及根际土壤矿质元素的积累, 且硫酸钾提高滇重楼根茎及根际土壤矿质元素含量幅度较氯化钾大, 原因是氯离子对植物吸收其他阳离子有拮抗作用, 而硫酸钾属于生理酸性肥料, 可以降低土壤 pH 值, 提高矿质元素有效性。两种钾肥配施比例结果表明, 提高硫酸钾比例或者单施硫酸钾更能促进滇重楼对矿质元素的吸收积累, 但单施硫酸钾处理下, 滇重楼根茎中 Ba、Cd、Pb、As、Co、Hg、Al 等有毒有害矿质元素积累也明显增加。同时本课题组已有研究结果也表明, 氯化钾和硫酸钾按 25:75 配施对滇重楼根际土壤微生物、酶活性和根系活力均有促进作用^[27], 因此建议重庆地区滇重楼栽培时氯化钾和硫酸钾的施用可按 25:75 的比例配施, 既能改善滇重楼根际土壤环境, 又能降低滇重楼吸收积累有害重金属的风险。

本研究目前只对不同钾肥种类及用量处理下的滇重楼根茎和根际土壤中矿质元素含量进行了分析评价, 后续将开展不同钾肥种类及用量对滇重楼产量和品质的综合影响研究, 为验证滇重楼是否“忌氯”及滇重楼栽培中不同钾肥种类及用量的选用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 张华, 杜慧慧, 郭冬琴, 等. 接种不同 AM 真菌对滇重楼幼苗功能基因表达的影响 [J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31 (2): 318-324.
- [2] 周浓, 张杰, 潘兴娇, 等. 丛枝菌根真菌对滇重楼内源激素的影响 [J]. 中草药, 2017, 48 (23): 4970-4978.
- [3] 吴剑锋, 齐川, 陈军华. 丽水市浙贝母-甘薯一年两茬高效栽培模式 [J]. 中国农技推广, 2018, 34 (8): 47-48.
- [4] 杜彩艳, 张乃明, 包立, 等. 钾素水平对二年生三七全生育期光合特性及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (4): 107-113.
- [5] 戚冰洁. 不同基因型甘薯苗期对盐 (氯) 胁迫响应及其生理生化与光合特性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [6] 徐瑶, 何玲莉, 黄思杰, 等. 施硫方式及时期对不结球白菜营养品质与光合特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (23): 115-120.

- [7] 周红梅, 范建芝, 井水华, 等. 两种钾肥不同用量对商薯 19 生长和产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016 (2): 99–103.
- [8] 郭小红, 周浓, 侯瑶, 等. 不同钾肥品种及配施对浙贝母产量和品质的影响 [J]. 中国野生植物资源, 2020, 39 (8): 6–12.
- [9] 金珂旭, 王正银, 樊驰, 等. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1369–1377.
- [10] 郑冬梅, 欧小宏, 米艳华, 等. 不同钾肥品种及配施对三七产量和品质的影响 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39 (4): 588–593.
- [11] 蒋向辉, 肖龙骞. 喀斯特土壤环境中 4 种先锋植物对硼元素的吸收与转运特性研究 [J]. 植物生理学报, 2021, 57 (4): 939–949.
- [12] 李诗奇, 李政, 王仙宁, 等. 植物对氮磷元素吸收利用的生理生态学过程研究进展 [J]. 山东农业科学, 2019, 51 (3): 151–157.
- [13] 尤垂淮, 孙青慧, 陈晟, 等. 镁营养对苦瓜生长发育及生理代谢的影响 [J]. 热带作物学报, 2021, 42 (12): 3545–3552.
- [14] 范朕连, 贾阳杰, 范远, 等. 盐碱土施用硅钙渣对披碱草生长的影响及机制 [J]. 草业学报, 2021, 30 (2): 93–101.
- [15] 于锡宏, 赵文博, 程瑶, 等. 磷钾营养元素对辽东楸木生长及品质的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2021, 52 (1): 20–28.
- [16] 谢武双, 陈卫平, 彭驰. 锰、镁元素对土壤 pH 值及镉有效性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (11): 252–255.
- [17] 张丽萍, 周喜荣, 张筠筠, 等. 不同施锌量对酿酒葡萄“赤霞珠”锌含量及其品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (3): 69–74.
- [18] 刘春增, 李本银, 郑春风, 等. 叶面喷钼对紫云英结实特性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (1): 135–140.
- [19] 袁梦, 李有芳, 张超博, 等. 柑橘铜胁迫研究进展 [J]. 果树学报, 2018, 35 (3): 347–357.
- [20] 李俊成, 于慧, 杨素欣, 等. 植物对铁元素吸收的分子调控机制研究进展 [J]. 植物生理学报, 2016, 52 (6): 835–842.
- [21] 白由路. 植物健康营养理论与健康元素 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (7): 1360–1366.
- [22] 张冉, 韩博, 任健, 等. 铝对植物毒害及草本植物耐铝毒机制研究进展 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学版), 2020, 35 (2): 353–360.
- [23] 朱娟娟, 喻春明, 陈继康, 等. 外源硒对饲用苕麻草产量和营养价值的影响 [J]. 草业学报, 2019, 28 (10): 144–155.
- [24] 李侠, 于明坚, 慎佳泓, 等. 杭州湾滩涂 Na 元素含量对植物多样性和优势度的影响 [J]. 生态学报, 2007 (11): 4603–4611.
- [25] 卢善发. 药用植物品质生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 91–92.
- [26] 赵慧琴, 石立, 刘金山, 等. SPSS 软件计算主成分分析的缺陷与纠正 [J]. 统计与决策, 2020, 36 (15): 56–59.
- [27] 魏祖晨, 赵顺鑫, 黎海灵, 等. 钾肥品种及配施比例对滇重楼根际土壤微环境及根茎生长调节的影响 [J]. 南方农业学报, 2021, 52 (6): 1568–1575.

Effects of different proportion of potassium chloride and potassium sulphate application on mineral element accumulation and rhizosphere soil nutrient content of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

XU Ling-feng, WANG Dan, LI Zhuo-wei, SHI Ru-jie*, ZHOU Nong* (College of Life Science and Engineering, Chongqing Engineering Laboratory for Green Planting and Deep Processing of Authentic Medicinal Materials in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120)

Abstract: The effects of potassium chloride (KCl) and potassium sulfate (K_2SO_4) on the accumulation of mineral elements in rhizosphere soil of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were analyzed to provide theoretical basis for the selection and application of potassium fertilizer in the cultivation of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. Pot experiment was conducted. Taking *P. polyphylla* var. *yunnanensis* as the control (CK) without potassium fertilizer, five fertilization treatments were set up with the combined application ratio of potassium chloride and potassium sulfate as 100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 and 0 : 100, respectively. The mineral elements in rhizome and rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* were digested by microwave, and determined by atomic fluorescence spectrometry (AFS) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that, compared with CK, the application of KCl and K_2SO_4 increased the accumulation of mineral elements in rhizome and rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, and the effects were increased with the increase of potassium application level. The accumulation of mineral elements in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* showed as the law of “rise-drop-rise-rise” under the different proportions of two kinds of potassium fertilizer. K_2SO_4 increased the content of mineral elements in rhizome and rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* more than that of KCl. In order to reduce the risk of excessive accumulation of toxic and harmful mineral elements in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and consider the economy of potassium chloride, potassium fertilizer can be applied in the proportion of 25 : 75 of KCl and K_2SO_4 when planting *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

Key words: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; potassium sulfate; potassium chloride; nutrient accumulation; rhizosphere soil