

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2023.05.011

Mehlich 3 浸提土壤养分的影响因素研究

杨建豪^{1,2} 张育维² 傅国海³ 钟永红³
杜森³ 高祥照³ 张丽娟^{1*} 汪洪^{2*}

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071001;
2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要 Mehlich 3 浸提剂被应用于浸提土壤中多种有效养分,但对方法的影响因素研究报道较少。选择重庆紫色土和河北的潮土两种土壤样品,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验,设置液土比(A)、振荡时间(B)、振荡温度(C)、浸提液 pH 值(D)4 个因素,对 Mehlich 3 法的浸提条件进行研究,浸提液使用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定元素含量。结果表明:对于土壤中的养分浸提影响因素依次为浸提液 pH 值>浸提液体积>振荡时间>振荡温度,结合经济效益以及显著性,综合各因素最优组合为 A1B1C1D1,即加入 pH 值为 2.5 的浸提液 25 mL,在 20 °C 下振荡 5 min。在最优条件下,除 B 元素外,其他元素测定值的相对标准偏差 RSD 在 0.39%~4.2%,精密密度良好。方法绿色环保、成本低、实用性强,适合土壤养分含量的测定。

关键词 Mehlich 3; 正交试验; 土壤有效养分; 浸提条件

中图分类号: O657.31 TH744.11 文献标志码: A 文章编号: 2095-1035(2023)05-0475-09

Study on Influencing Factors of Soil Nutrient Content by Mehlich 3 Leaching

YANG Jianhao^{1,2}, ZHANG Yuwei², FU Guohai², ZHONG Yonghong³,
DU Sen³, GAO Xiangzhao³, ZHANG Lijuan^{1*}, WANG Hong^{2*}

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China;
2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
3. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract The extracting agent of Mehlich 3 has been used to extract and determine various available nutrients in the soil. However, there are few studies on the influencing factors of this method. We selected two soil samples such as purple soil from Chongqing and aquatic soil from Hebei. Orthogonal test with $L_9(3^4)$ was designed four factors including the volume of extract solution (A), shaking time (B), shaking

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 农业农村部测土配方施肥项目(2019-2022 年)

作者简介: 杨建豪, 男, 硕士研究生, 主要从事土壤养分测试方法研究。E-mail: 15703039724@163.com

* 通信作者: 张丽娟, 女, 教授, 主要从事土壤环境质量、土壤养分资源与利用研究。E-mail: lj_zh2001@163.com

汪洪, 男, 研究员, 主要从事作物微量元素营养与肥料、土壤肥料农化测试技术研究。E-mail: wanghong01@caas.cn

引用格式: 杨建豪, 张育维, 傅国海, 等. Mehlich 3 浸提土壤养分的影响因素研究[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(5): 475-483.

YANG Jianhao, ZHANG Yuwei, FU Guohai, et al. Study on Influencing Factors of Soil Nutrient Content by Mehlich 3 Leaching[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(5): 475-483.

temperature(C), and pH of extraction solution(D) were set to study extraction conditions of using the Mehlich 3. The element concentrations of the extract were determined by inductively coupled plasma emission spectrometer(ICP-OES). The results showed the amount of soil available nutrients increased with increasing pH of the extract solution. oscillation temperature had less influence on the content of soil nutrients. Considering the economic benefits and significance, it is suggested that the optimal conditions for extracting soil nutrients by Mehlich 3 were A1B1C1D1. A portion of 5.00 g of the air-dried soil samples was added with 25.0 mL of Mehlich 3 extraction solution with a pH of 2.5, which was shaken at 20 °C for 5 min. Under optimal conditions, the relative standard deviation of elements is between 0.39% and 4.2%, with good precision except for the B element. The method is green, low-cost, practical, and suitable for the determination of soil nutrient content.

Keywords Mehlich 3; orthogonal test; soil available nutrients; the extraction conditions

植物生长所必需营养元素包括碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、钼、硼、氯、镍。除碳、氢、氧三种元素来自于二氧化碳和水,其他的元素均来自于土壤。土壤有效养分是指在短期内能够被植物根系吸收的养分,主要是指位置接近植物根表或者短期内可以迁移到根表的有效养分,以矿质元素为主^[1]。测定土壤有效养分含量,可有效诊断土壤养分供应丰缺程度^[2]。

常规的土壤养分测试方法主要运用化学溶液提取土壤中的养分。土壤有效养分浸提测定普遍采用传统常规方法,每一种有效养分采用一种浸提剂^[3],如测定土壤有效磷常用的方法有 Olsen 法和 Bray I 法浸提,在酸性土壤中使用 Bray I 浸提剂(0.025 mol/L HCl+0.03 mol/L NH₄F,土液比 1:10)^[4],可以提取土壤中磷酸钙、磷酸铝和磷酸铁^[5];在中性和碱性土壤中使用 Olsen 法(0.5 mol/L NaHCO₃,土液比 1:20)提取,适用于大多数高离子交换量和游离状态的碳酸钙的土壤。土壤速效钾测定方法采用 1 mol/L 中性醋酸铵浸提法,醋酸铵可以将土壤中的交换性钾和被黏土矿物固定的非交换性钾分离,浸提剂中的 NH₄⁺ 可以将土壤胶体中的 K⁺ 交换出来^[6]。土壤中微量元素可由 CaCl₂-DTPA(0.005 mol/L DTPA+0.01 mol/L CaCl₂+0.1 mol/L TEA,土液比 1:2,pH=7.3)法测定^[7]。

常规方法浸提土壤养分测定结果虽然准确度高,但常常只能提取单一元素,浸提步骤繁琐,工作量大。由此,测试效率高、联合通用的浸提剂被开发^[8-12]:Morgan 试剂、Mehlich 1 试剂、Soltanpour-Swab(AB-DTPA)试剂、Morgan-Wolf 试剂、ASI 浸提剂和 Mehlich 3 试剂等。Mehlich 3 试剂是在 1982 年正式提出的,广泛应用于各类土壤^[13-15],该浸提剂包括 0.001 mol/L EDTA、0.013 mol/L

HNO₃、0.015 mol/L NH₄F、0.25 mol/L NH₄NO₃、0.2 mol/L HOAc,可以直接浸提出土壤中的多种速效元素,浸提快速、稳定。ECKERT 等^[15]使用 Mehlich 3 试剂浸提土壤有效磷,待测液使用比色法和 ICP 法测定,所得的两种测定结果具有显著相关性,MESSIGA 等^[16-18]的研究也得出了类似的结论。王永欢等^[19-20]的研究结果表明使用 Mehlich 3 方法浸提后的土壤养分测定结果和常规方法测定结果之间的相关性显著。邹娟^[21]使用 Mehlich 3 方法对长江流域油菜区土壤养分丰缺指标的建立,初步构建了长江流域冬油菜施肥技术体系。韩秀英^[22]选择山西省 138 个土壤样品制定了 Mehlich 3 方法的初步分级标准,确定了山西省土壤的养分丰缺指标。但是对于 Mehlich 3 方法浸提条件的研究报道相对较少。

选择酸性和碱性两种土壤样品,设计 L₉(3⁴)正交试验,设置浸提液体积即液土比(A)、振荡时间(B)、振荡温度(C)、浸提液 pH 值(D)四个因素,浸提液使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定元素含量^[23-24],旨在对 Mehlich 3 法的浸提条件与影响因素进行研究,以期更好地应用 Mehlich 3 这一高效通用土壤养分浸提方法,为测土配方施肥提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 供试土样

选择 2 个紫色土和潮土作为供试土壤,分别采自重庆和河北,采样深度为耕层 20 cm。除去土壤样品中的植株残茬、石砾等异物,样品风干后,研磨通过孔径 2 mm 塑料筛。

1.2 主要试剂

硝酸铵、硝酸、冰醋酸、氟化铵、乙二胺四乙酸均

为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。待测元素标准储备溶液(1 000 mg/L)为钢研纳克检测技术股份有限公司生产。

1.3 Mehlich 3 浸提液配制

称取 138.9 g 氟化铵溶于约 600 mL 塑料烧杯的水中,充分溶解再加入 73.1 g EDTA,溶解后转移至 1 000 mL 塑料容量瓶中后定容(保存在冰箱内可长期使用)。

Mehlich 3 提取液:称取 20 g 硝酸铵于塑料烧杯中,加水 500 mL 使其充分溶解,加入 0.82 mL 浓硝酸和 11.5 mL 冰醋酸,充分混匀后加入 4 mL 氟化铵储存液,加水至 950 mL 后,用氨水调整 pH 值为 2.5、4.5、6.5,混匀转移至 1 000 mL 塑料容量瓶中并定容。

1.4 设备仪器与主要工作参数

Optima 5300 DV 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),其主要工作参数详见表 1。

表 1 ICP-OES 的主要工作参数

Table 1 The operating parameters of ICP-OES

工作参数	数值
等离子体流量/(L·min ⁻¹)	15
辅助气流量/(L·min ⁻¹)	0.2
雾化气流量/(L·min ⁻¹)	0.8
射频功率/W	1 300
泵速/(L·min ⁻¹)	1.5

1.5 实验方法

设计正交试验 L₉(3⁴)四个影响因素(表 2),分别为浸提液体积(A)、振荡时间(B)、振荡温度(C)、浸提液 pH 值(D),每个因素 3 水平,共 9 个处理,A 三水平编码 A₁、A₂、A₃ 分别为 25、50、100 mL;B 三水平编码 B₁、B₂、B₃ 分别为 5、15、30 min;C 三水平编码 C₁、C₂、C₃ 分别为 20、25、30 °C;D 三水平编码 D₁、D₂、D₃ 分别为 pH 值 2.5、4.5、6.5。每个处理 6 次重复。

称取 5.00 g(精确至 0.001 g)土壤于 200 mL 塑料瓶中,加入一定量的浸提液后盖紧瓶塞放入往复振荡器(YJY-2112F,上海跃进医疗器械有限公司),设定实验的温度与时间,进行振荡浸提一定时间,取出过滤后,用 ICP-OES 测定 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、S、Na、B,仪器各元素工作波长如表 3 所示。

1.6 测定波长

待测液中待测元素利用 ICP-OES 测定,各元素特征波长见表 3。

1.7 标准工作曲线

分别吸取适量待测元素标准溶液于 100 mL 塑料容量瓶中,加入 Mehlich 3 浸提液定容,混匀,配制成标准溶液元素。以各元素标准溶液的质量浓度(mg/L)(*x*)为横坐标,相应的辐射强度(*y*)为纵坐标,制作标准工作曲线。标准系列溶液各元素质量浓度(mg/L)和标准工作曲线方程见表 4。

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design

序号	称取土重/g	A 浸提液体积/mL	B 振荡时间/min	C 振荡温度/°C	D 浸提剂 pH 值
T1	5.00	1(25)	1(5)	1(20)	1(2.5)
T2	5.00	2(50)	2(15)	3(30)	1(2.5)
T3	5.00	3(100)	3(30)	2(25)	1(2.5)
T4	5.00	2(50)	1(5)	2(25)	2(4.5)
T5	5.00	3(100)	2(15)	1(20)	2(4.5)
T6	5.00	1(25)	3(30)	3(30)	2(4.5)
T7	5.00	3(100)	1(5)	3(30)	3(6.5)
T8	5.00	1(25)	2(15)	2(25)	3(6.5)
T9	5.00	2(50)	3(30)	1(20)	3(6.5)

表 3 ICP-OES 测定波长

Table 3 Wavelength for determining various elements by ICP-OES

元素	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B
波长	213.617	766.490	317.933	285.213	238.204	257.640	327.393	206.200	181.975	589.592	249.677

表 4 ICP-OES 测定标准系列溶液元素质量浓度和标准工作曲线方程
Table 4 Element concentration and standard operating curve equation of standard series of solutions determined by ICP-OES

元素	标准溶液元素浓度/(mg·L ⁻¹)				曲线方程	相关系数
	空白	浓度 1	浓度 2	浓度 3		
P	0	10	25	50	$y=1582x-256.7$	0.999 2
K	0	10	25	50	$y=97400x-145864.2$	0.997 1
Ca	0	50	100	500	$y=74180x+516770.4$	0.999 6
Mg	0	10	50	100	$y=287800x+309542.6$	0.999 5
Fe	0	10	25	50	$y=56580x-11885.4$	0.999 5
Mn	0	2	5	10	$y=276100x+24808.9$	0.999 8
Cu	0	2	5	10	$y=155000x+13164.9$	0.999 8
Zn	0	2	5	10	$y=14640x+5137.7$	0.996 5
S	0	10	25	50	$y=231.3x+110.6$	0.999 7
Na	0	10	25	50	$y=556900x-73485.8$	0.999 8
B	0	2	5	10	$y=40890x+1042.5$	0.999 8

2 结果与讨论

2.1 极差分析

通过极差分析对不同土壤各元素浸提的影响能力进行计算并确定各个元素最优组合,结果见表 5。

极差反应各因素水平变化对实验指标的影响。极差越大,代表在该因素条件下的水平对指标的影响越大。四因素对两种土壤速效养分浸提含量影响最大的是浸提液 pH 值,其次为浸提液体积和振荡时间,影响最小的为振荡温度。

表 5 土壤各元素极差

Table 5 Extreme difference of soil elements

元素	A	B	C	D	最优组合	
紫色土	P	23.97	21.41	7.26	81.18	A3B3C1D1
	K	34.80	21.46	4.94	58.54	A3B3C1D1
	Ca	906.14	1 101.83	1 134.47	1 329.50	A3B3C3D3
	Mg	85.39	118.44	57.19	265.57	A3B3C3D1
	Fe	508.03	307.44	341.70	827.08	A3B3C2D1
	Mn	46.37	26.80	30.83	150.47	A3B3C2D1
	Cu	0.15	0.43	0.37	1.34	A1B3C1D3
	Zn	2.45	1.21	0.14	1.98	A3B1C1D1
	S	2.52	3.24	1.05	7.36	A3B3C3D2
	Na	74.33	11.01	3.09	22.13	A3B3C3D1
B	2.40	1.56	1.48	3.97	A1B1C3D3	
潮土	P	196.18	99.83	34.49	100.82	A3B3C2D1
	K	29.50	19.39	23.29	74.59	A3B1C1D1
	Ca	127.94	1 404.21	1 093.32	1 467.51	A3B3C1D1
	Mg	137.68	127.82	45.28	313.91	A3B3C2D1
	Fe	273.40	364.07	253.38	404.16	A3B3C2D1
	Mn	34.67	28.64	7.57	152.77	A3B2C1D1
	Cu	0.48	0.49	0.34	1.00	A1B3C1D1
	Zn	1.95	0.97	1.16	0.69	A3B1C3D3
	S	13.94	10.24	10.94	10.83	A3B2C1D2
	Na	65.05	15.59	11.51	24.62	A3B1C1D1
B	0.28	0.45	0.30	0.92	A3B3C2D1	

2.2 浸提液体积的影响

由图 1 和图 2 可见,两个土壤铜的含量在加入 25 mL 浸提液时浸提养分含量最高,100 mL 浸提液时浸提含量最低;速效钾和锌的含量在加入 50 mL 浸提液时浸提含量最低,加入 100 mL 浸提液时浸提养分含量最高;其他元素浸提出的含量在添加

25 mL 浸提液时浸提含量最低,添加 100 mL 浸提液时浸提养分含量最高。由表 6 可知,浸提液体积只对两个土壤中钠的含量以及潮土速效磷含量增加影响极显著,对其余元素含量增加影响不显著。对于钠推荐加入浸提液为 100 mL,其他元素推荐加入浸提液为 25 mL。

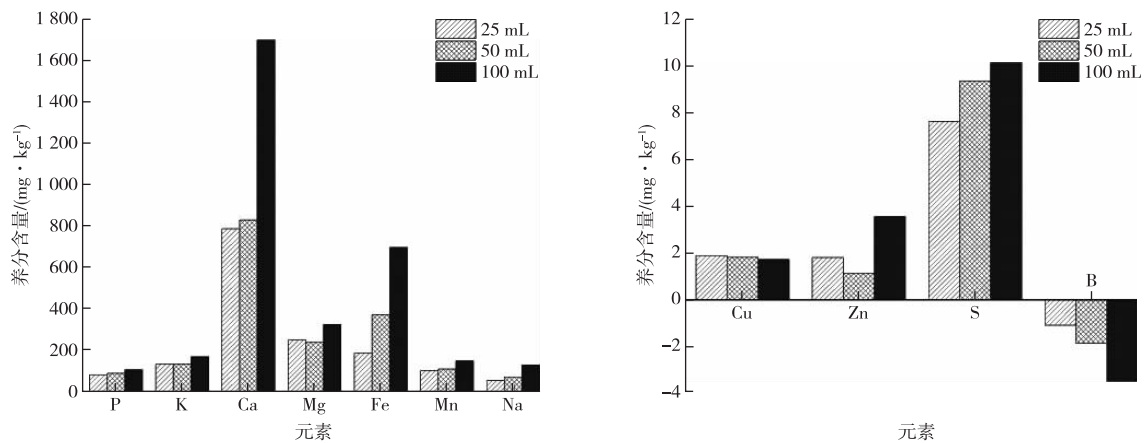


图 1 浸提液体积对紫色土浸提养分含量影响

Figure 1 Effect of extraction liquid volume on nutrient content of purple soil.

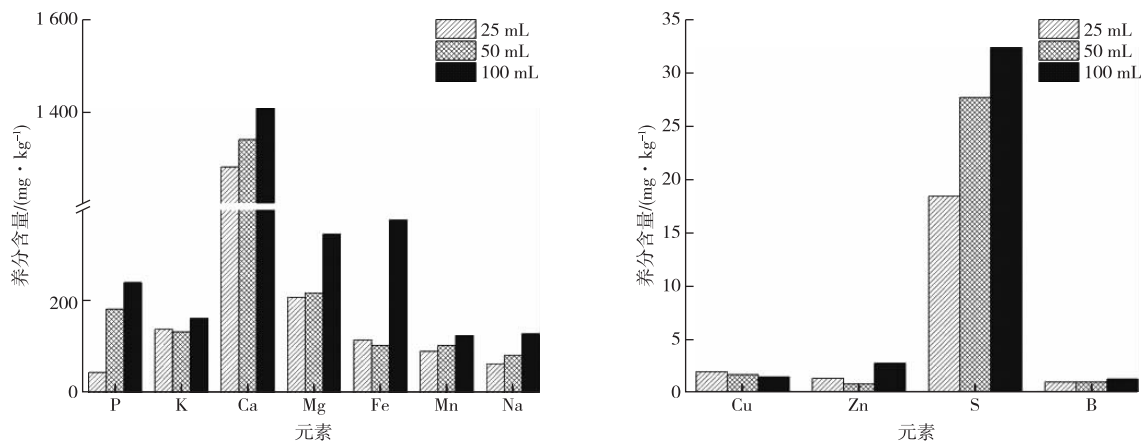


图 2 浸提液体积对潮土浸提养分含量影响

Figure 2 Effects of extract solution on nutrient content of aquatic soil leaching.

表 6 浸提液体积对浸提养分 *F* 检验方差分析

Table 6 Variance analysis of *F* test for extract solution on leaching nutrient

样品	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B
紫色土	1.53	5.47	0.78	0.99	0.83	1.68	1.08	2.02	0.94	77.72**	0.82
潮土	7.05**	0.46	0.10	1.64	0.94	2.54	0.57	1.55	1.33	13.01**	0.28

注:**表示该条件对浸提养分含量影响极显著,下同。

2.3 振荡时间的影响

由图 3 和图 4 可见,两个土壤锌含量振荡 5 min 时浸提含量最高,振荡 30 min 时浸提含量最低;速效钾含量振荡 30 min 时浸提含量最高,振荡 15 min 时浸提含量最低;其余元素浸提出的含量都在振荡 30 min 时浸提养分含量最高,振荡 5 min 时浸提养分含量最低。由表 7 可知,振荡时间对所有元素含量增加或减少都不显著。推荐振荡时间为

5 min。

2.4 振荡温度的影响

由图 5 和图 6 可见,速效磷、速效钾、钙、锌和硫含量在 25 °C 时浸提含量最低;镁、铁和铜含量在 25 °C 时浸提含量最高;锰和钠的含量在 20 °C 时浸提含量最高,在 30 °C 时浸提含量最低。由表 8 可知,振荡温度对所有元素含量增加或减少都不显著。推荐振荡温度为 20 °C。

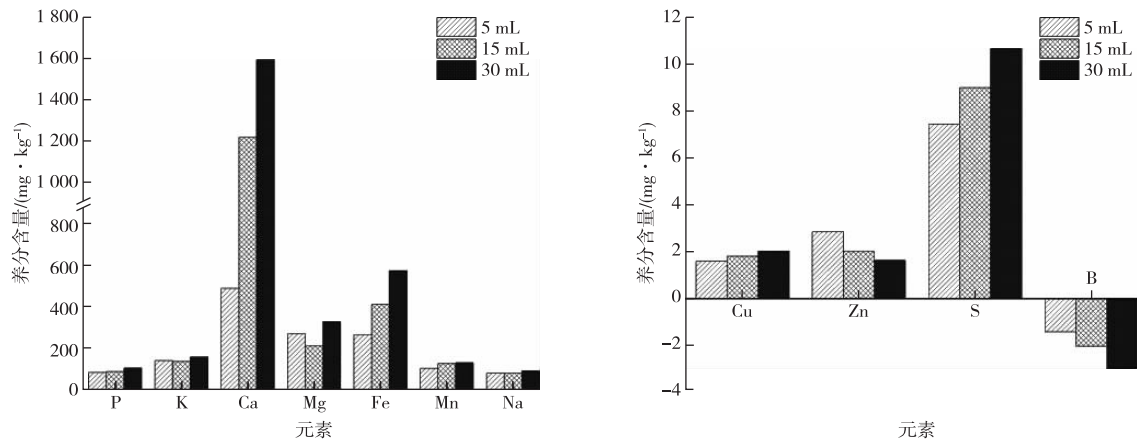


图 3 振荡时间对紫色土浸提养分含量影响

Figure 3 Effects of shaking time on nutrient content of purple soil leaching.

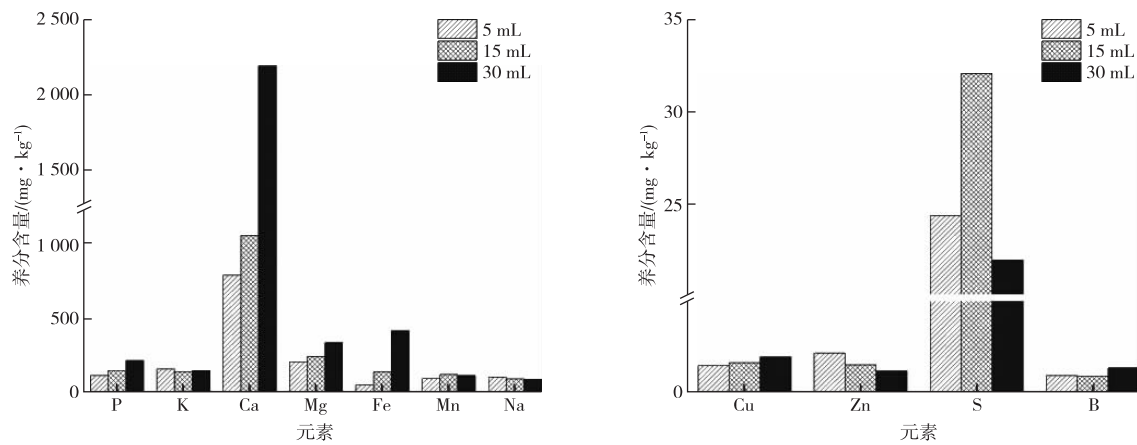


图 4 振荡时间对潮土浸提养分含量影响

Figure 4 Effects of shaking time on nutrient content of aquatic soil leaching.

表 7 振荡时间对浸提养分 F 检验方差分析

Table 7 Variance analysis of F test for leaching nutrient by shaking time

样品	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B
紫色土	1.30	1.78	0.94	1.61	0.30	0.56	1.22	0.49	1.48	1.88	0.34
潮土	1.79	0.18	1.43	1.21	1.41	1.87	0.58	0.37	0.76	0.78	0.71

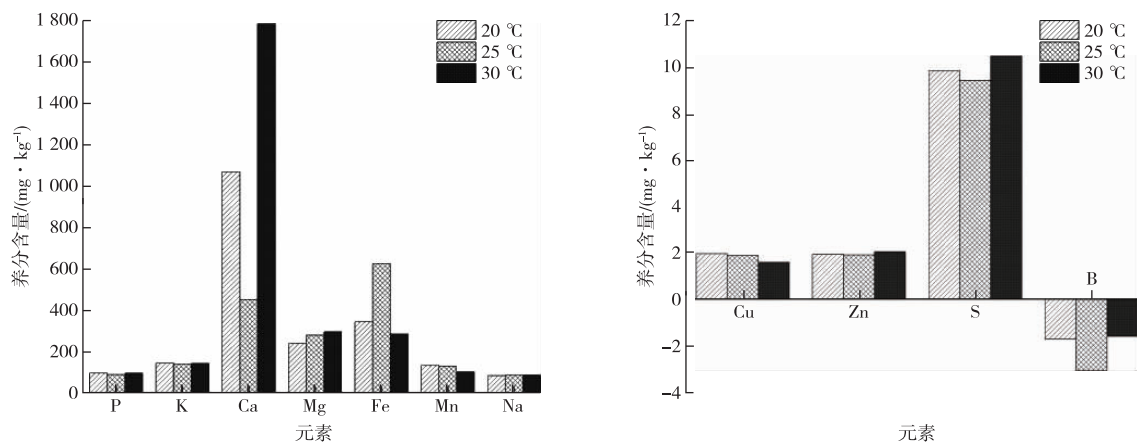


图 5 振荡温度对紫色土浸提养分含量影响

Figure 5 Effects of shaking temperature on nutrient content of purple soil extraction.

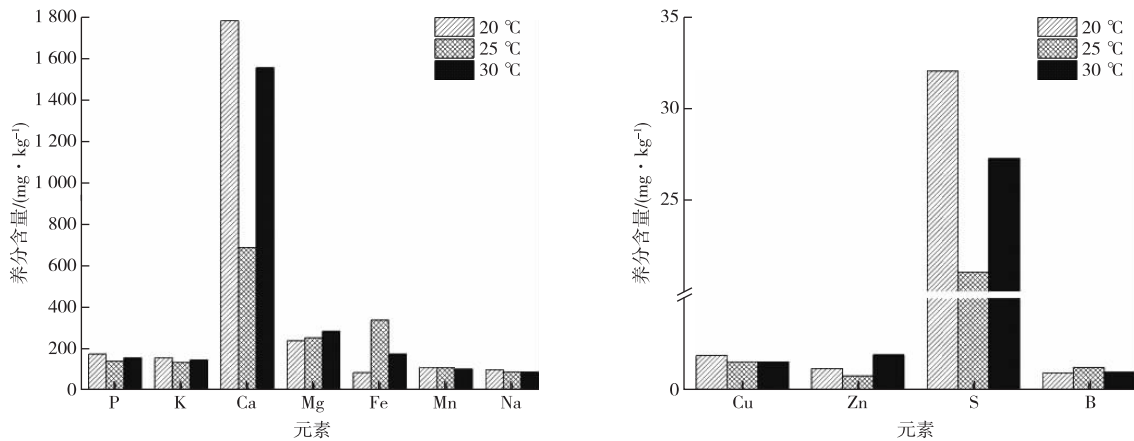


图 6 振荡温度对潮土浸提养分含量影响

Figure 6 Effects of shaking temperature on nutrient content of aquatic soil leaching.

表 8 振荡温度对浸提养分 F 检验方差分析

Table 8 Variance analysis of F test for shaking temperature on leaching nutrient

样品	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B
紫色土	0.17	0.22	1.32	0.40	0.42	0.75	1.08	0.23	0.59	0.12	0.37
潮土	0.21	0.25	0.59	0.15	0.65	0.13	0.37	1.89	1.12	0.47	0.28

2.5 浸提液 pH 值的影响

由图 7 和图 8 可见, 两种土壤锌的含量在 pH 值为 4.5 时浸提含量最低; 硫的含量在 pH 值为 2.5 时浸提含量最低, 在 pH 值为 4.5 时浸提含量最高; 紫色土钙含量在 pH 值为 2.5 时浸提含量最低, 在 pH 值为 6.5 时浸提含量最高, 其余元素浸提出的养分含量在 pH 值为 2.5 时浸提养分含量最高, 在 pH 值为 6.5 时浸提含量最低。由表 9 可知浸提液 pH 值对两个土壤镁和锰含量以及紫色土速效磷、

速效钾、硫和钠的含量影响极显著, 对其余元素含量影响不显著。当 pH 值过高的时候, 会造成测定土壤中养分浸出不完全, 造成测定养分含量过低的情况。推荐加入浸提液 pH 值为 2.5。

2.6 精密度实验

对两个土壤各设置六个平行样, 根据加入 pH=2.5 的浸提液 25 mL, 在 20 °C 下振荡 5 min, 计算各个元素的相对标准偏差, 见表 10。除 B 为负值外, 所有元素的相对标准偏差都小于 5%, 精密度较高。

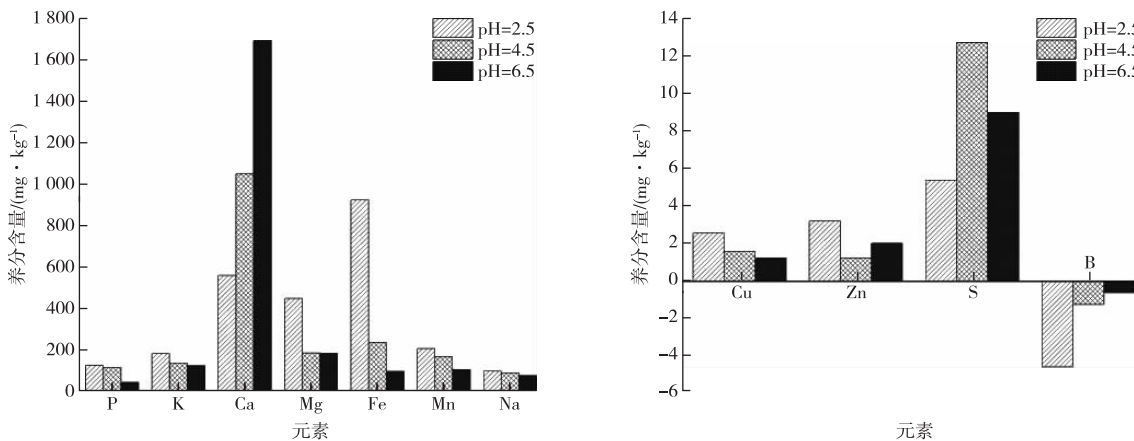


图 7 浸提液 pH 值对紫色土浸提养分含量影响

Figure 7 Effects of pH value of extraction solution on nutrient content of purple soil.

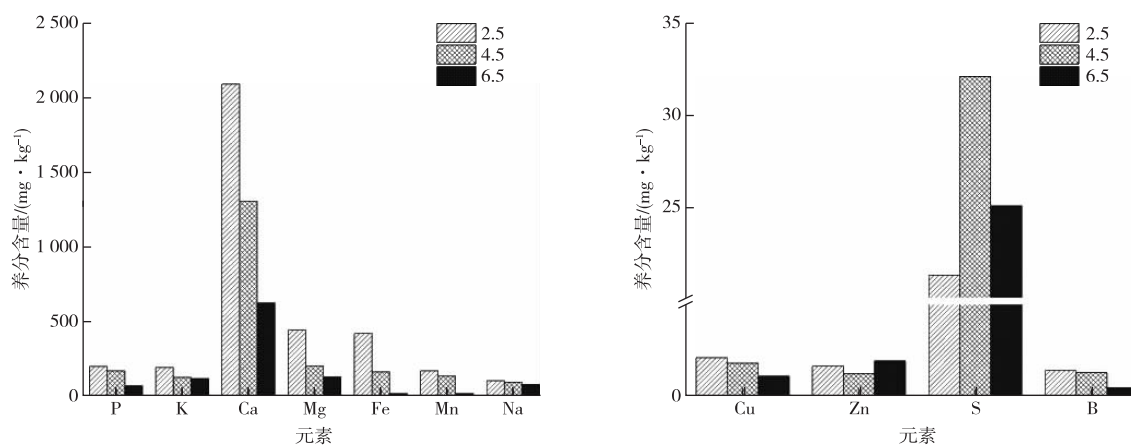


图 8 浸提液 pH 值对潮土浸提养分含量影响

Figure 8 Effect of pH value of extraction solution on nutrient content of aquatic soil leaching.

表 9 浸提液 pH 值对浸提养分 F 检验方差分析

Table 9 Variance analysis of F test for pH value of extraction solution on leaching nutrient

	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B
紫色土	19.63**	12.84**	0.96	10.69**	2.46	15.84**	0.62	1.25	7.61**	6.30**	2.48
潮土	3.95	3.11	1.88	7.44**	1.66	53.16**	2.48	0.19	0.80	1.76	2.73

表 10 方法的精密度

Table 10 Precision of method (n=6)

样品	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Na	B	/%
紫色土	0.91	1.7	2.7	1.4	1.5	3.1	4.2	1.6	4.7	2.6	0	
河北	0.39	1.2	3.2	1.6	1.1	2.1	3.7	2.2	5.4	2.3	3.3	

3 结论

通过正交试验对 Mehlich 3 方法浸提条件进行探究,由 ICP-OES 测定的结果可以看出:对于土壤中的养分浸提影响因素依次为浸提液 pH 值>浸提液体积>振荡时间>振荡温度,结合经济效益以及显著性,综合各因素最优组合为 A1B1C1D1,即加入 pH 值为 2.5 的浸提液 25 mL,在 20 °C 下振荡 5 min。该方法除 B 为负值外,所有元素的 RSD 都小于 5%,精密度良好。

参考文献

- [1] 冯俊,杨发忠,何袖辉,等.云南富源某地区土壤 8 种有效态元素的测定[J].中国无机分析化学,2022,12(6):61-66.
FENG Jun, YANG Fazhong, HE Xuhui, et al. Yunnan fuyuan determination of 8 kinds of soil effective state elements in a given area[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(6): 61-66.
- [2] 何承顺,汪军.石灰性土壤多种有效养分通用浸提剂的研究[J].土壤通报,1993,24(6):283-285.
HE Chengshun, WANG Jun. Study on the general extraction agent of various effective nutrients in

calcareous soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1993, 24(6): 283-285.

- [3] 杜森,黄青青,李花粉.土壤通用浸提剂与有效养分测试研究进展[J].现代农业科技,2010(16):286-287,291.
DU Sen, HUANG Qingqing, LI Huafen. Research progress of universal soil extract and available nutrient testing[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(16): 286-287, 291.
- [4] 武巍,闫孝贡,杨建,等. Olsen 法和 Bray 法实用性及可行性探讨[J].农业与技术,2007,27(5):174-178.
WU Wei, YAN Xiaogong, YANG Jian, et al. Discussion on the practicability and feasibility of Olsen method and Bray method[J]. Agriculture and Technology, 2007, 27(5): 174-178.
- [5] ANTHONY P M, ARAI Y. Investigation of acid hydrolysis reactions of polyphosphates and phytic acid in Bray and Mehlich III extracting solutions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(7): 737-742.
- [6] 赵玉婷,于鹏,祝贺鹏,等.不同类型农田土壤交换性钙镁测定方法的研究[J].农业与技术,2021,41(6):56-60.
ZHAO Yuting, YU Peng, ZHU Hepeng, et al. Determination of exchangeable calcium and magnesium in different types of cropland soil[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(6): 56-60.

- [7] KHAN A, SOLTANPOUR P N. Effect of wetting and drying on DTPA extractable Fe, Zn, Mn, and Cu in soils[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1978, 9(3):193-202.
- [8] SOLTANPOUR P N, SCHWAB A P. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1977, 8(3):195-207.
- [9] HUNTER A H. Laboratory and green house techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth[R]. Mimeograph: Agro Service International Florida USA, 1980.
- [10] 金继运, 张宁, 梁鸣早, 等. 土壤养分状况系统研究法在土壤肥力研究及测土施肥中的应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(1):8-15.
JIN Jiyun, ZHANG Ning, LIANG Mingzao, et al. Application of soil nutrient status system method in soil fertility research and soil measurement and fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1996, 2(1):8-15.
- [11] 金继运. 土壤养分状况系统研究法及其在我国的初步应用[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
JIN Jiyun. Systematic research method of soil nutrient status and its preliminary application in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995.
- [12] MEHLICH A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1984, 15(12):1409-1416.
- [13] SIMS J T. Comparison of Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for P, K, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn in Atlantic coastal plain soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20(17-18):1707-1726.
- [14] MICHAELSON G J, PING C L, MITCHELL G A. Correlation of Mehlich 3, Bray 1, and ammonium acetate extractable P, K, Ca and Mg for Alaska agricultural soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18(9):1003-1015.
- [15] ECKERT D J, WATSON M E, HOOD T M, et al. Integrating the Mehlich-3 extractant into existing soil test interpretation schemes[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(5):1237-1249.
- [16] MESSIGA A A J, BA Y, ZIADI N, et al. Assessing the depletion of soil P following sequential extractions with Mehlich-3 and Olsen solutions[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2014, 60(10):1445-1458.
- [17] KABALA C, CEZARY B, GALKA B, et al. Towards more simple and coherent chemical criteria in a classification of anthropogenic soils: a comparison of phosphorus tests for diagnostic horizons and properties[J]. *Geoderma An International Journal of Soil Science*, 2018, 320:1-11.
- [18] FUKUDA M, NAKAMURA S, FONSECA A D C L, et al. Evaluation of the Mehlich 3 reagent as an extractant for cations and available phosphorus for soils in Mozambique[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(12):1462-1472.
- [19] 王永欢, 陈洪斌, 王丽, 等. Mehlich3 方法与常规方法测定土壤养分相关性初步研究[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4):917-920.
WANG Yonghuan, CHEN Hongbin, WANG Li, et al. Preliminary study on correlation between Mehlich3 method and conventional method for soil nutrient determination[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):917-920.
- [20] 于文, 苏俊, 吴家富, 等. 基于常规法和 M3 法的土壤养分施肥指标的研究[J]. *吉林农业*, 2014(6):86.
YU Wen, SU Jun, WU Jiafu, et al. Study on soil nutrient and fertilization indexes based on conventional method and M3 method[J]. *Jilin Agriculture*, 2014(6):86.
- [21] 邹娟. 冬油菜施肥效果及土壤养分丰缺指标研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
ZOU Juan. Study on fertilization effect and soil nutrient abundance and deficiency index of winter rape[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [22] 韩秀英. Mehlich 3 法测定石灰性土壤有效养分的适用性研究[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(1):104-110.
HAN Xiuying. Determination of available nutrients in calcareous soil by Mehlich 3 method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(1):104-110.
- [23] 吕康, 李优琴, 倪晓璐, 等. 超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定土壤中 18 种元素[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(2):123-128.
LYU Kang, LI Youqin, NI Xiaolu, et al. Determination of 18 elements in soil by super microwave digestion-inductively coupled plasma emission spectrometry(ICP-OES) [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(2):123-128.
- [24] 袁源, 赵平, 陈海杰, 等. 高分辨电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS)法测定土壤污染状况调查样品中的 49 种元素[J]. *中国无机分析化学*, 2021, 11(1):12-19.
YUAN Yuan, ZHAO Ping, CHEN Haijie, et al. Determination of 49 elements in soil pollution samples by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICP-MS) [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2021, 11(1):12-19.