

云南富源某地区土壤 8 种有效态元素的测定

冯俊^{1,2} 杨发忠^{1*} 何袖辉² 唐帅帅² 胡斯涵²

(1. 西南林业大学 化学工程学院, 昆明 650000; 2. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650000)

摘 要 一种 DTPA 土壤测试被成功开发并应用到云南富源某地区, 以识别土壤中的有效锌、铁、锰、铜、铅、钴、镍和镉的含量, 用于指导该地区的土壤施肥情况以获得作物的最大产量。提取剂由 DTPA (二乙烯三胺五乙酸, 0.005 mol/L)、三乙醇胺 (0.1 mol/L) 和 CaCl_2 (0.01 mol/L) 混合组成, pH 值为 7.3。土壤测试包括用 20 mL 的提取剂震荡 10 g 风干土壤 2 h, 过滤滤液, 用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 法测定滤液中的锌、铁、锰、铜、铅、钴、镍和镉。根据作物对锌、铁和锰等有效态的反应, 土壤测试使用标准化的土壤准备、研磨和提取程序。提取剂在 pH 值 7.30 时得到缓冲, 选用能有效地提取 8 种微量元素金属 DTPA 作为螯合剂。通过大量实验确定最佳的震荡时间是 2 h, 最佳的水土比是 2:1。通过实验, 方法线性相关系数 $R>0.99$, 国家一级标准物质的准确度、精密度和检出限满足云南富源地区土壤检测要求, 确定了此地的土壤检测方法, 并通过加标回收实验, 回收率在 90.0%~110%。方法绿色环保、简单快捷、准确度高, 适合该地区土壤有效态的分析。

关键词 二乙烯三胺五乙酸; 有效态; ICP-OES; 水土比; 螯合剂

中图分类号: O657.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1035(2022)06-0061-06

Determination of 8 Available Elements in Soil of Fuyuan, Yunnan Province

FENG Jun^{1,2}, YANG Fazhong^{1*}, HE Xiuhui², TANG Shuaishuai², HU Sihan²

(1. Chemical Engineering College of Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650000, China;

2. Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center of China Geological Survey, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract A DTPA soil test has been successfully developed and applied to a certain area in Fuyuan, Yunnan province, to identify the available zinc, iron, manganese, copper, lead, cobalt, nickel and cadmium contents in the soil, and to guide the soil fertilization in this area to obtain the maximum crop yield. The extractant was composed of 0.005 mol/L DTPA (diethylenetriamine pentaacetic acid), 0.1 mol/L triethanolamine and 0.001 mol/L CaCl_2 with pH 7.3. Soil tests included shaking 10 g of air-dried soil with 20 mL of extractant for 2 hours, filtering leachate, and determining zinc, iron, manganese, copper, lead, cobalt, nickel and cadmium in the filtrate by ICP-AES. Soil testing uses standardized soil preparation, grinding, and extraction procedures based on crop responses to available states such as zinc, iron and

收稿日期: 2022-01-13 **修回日期:** 2022-07-15

基金项目: 云南富源-贵州盘州能源矿产集中区生态修复支撑调查项目 (DD20208075)

作者简介: 冯俊, 男, 工程师, 主要从事化学分析研究。E-mail: fengyingxiong00@sina.com

* **通信作者:** 杨发忠, 男, 副教授, 研究生导师, 主要从事化学生态学研究。E-mail: yangfazhong105@163.com

引用格式: 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 Xiuhui, et al. Determination of 8 Available Elements in Soil of Fuyuan, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(6): 61-66.

manganese. The extractant was buffered at pH 7.3 and DTPA, which can effectively extract 8 trace elements, was selected as chelating agent. Through a large number of experiments, it is determined that the best oscillation time is 2 h and the best water-soil ratio is 2 : 1. Through experiments, the linear correlation coefficient $R > 0.99$. The accuracy, precision and detection limit of the national first-class reference materials meet the requirements of soil detection in Fuyuan area of Yunnan province. The exact soil detection method is determined and the recovery is between 90.0% and 110% through the recovery experiment of adding standards. The method is green, simple, fast and accurate, which is suitable for the analysis of soil available state in this area.

Keywords DTPA; effective state; ICP-OES; water-soil ratio; chelating agent

随着我国工业、农业和城镇化的快速发展,有毒有害固体和废液和生活废水的大量排放,再加上一些排水管网的渗漏和农业化学药品的大量使用,土壤圈成为最直接的受害体,受到最为广泛的危害。其中土壤中的重金属污染危害性最大,有难利用、难分解、潜伏期长、不可逆性和时间长等特性,正受到世界各国的关注。重金属排放到土壤圈后,很难在能量交换中利用,也很难分解,大多情况下在土壤中富集,对土壤的功能稳定和生态结构造成破坏,不利于农作物的正常生长^[1-3],人通过食物链吸收富集在植物里面的有害元素,对人体健康产生严重威胁。随着研究的深入,全量分析不能全面了解土壤的养分情况和污染情况,重金属在土壤中存在多种对生物有效性不同的形态,研究表明生物有效性不仅和全量有关,更大程度决定于形态分布^[4-7]。土壤成分复杂,背景波动范围大,不均一,元素转化反应机理复杂,对目的元素有效态含量进行检测,是确切了解土壤质量,也是土壤修复、治理的理论基础。对土壤中有效态的测定有很多报道,包括原子吸收光谱法、分光光度法、电感耦合等离子体质谱法和光谱法等^[8-9]。但大部分的报道只是检测规范的应用,对规范的应用范围和条件变化报道很少。本文从有效态提取剂的配制和提取过程的条件控制,来研究 DTPA 提取云南富源某地区的 8 种有效态元素,解决该地区土壤肥力状况和污染情况,为该地区土壤修复和施肥提供技术支持。

关于有效态的定义,目前还没有统一的标准,从土壤化学方面看,有效态包括水溶态、酸溶态、螯合态、吸附态,也包括能在短时期内释放为植物吸收利用的某些形态^[10-13]。DTPA 浸提取土壤中的有效成分和植物吸收有很好的相关性,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定锰、镉、铁、铜、铅、锌、镍和钴 8 种元素。

1 材料与方法

1.1 供试材料

6300 系列电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,美国热电公司),振荡器(上海优普实业有限公司智能恒温培养振荡器),离心机(湖南湘立科学仪器有限公司),pH 计(雷磁 PHS-3E 上海仪电科学仪器股份有限公司)。土壤标准样品 GBW07415a、GBW07416a、GBW07461 均为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研制;云南富源土壤样品(未知样品);实验所用器皿均用硝酸溶液浸泡 24 h 后,使用超纯去离子水清洗干净后,干燥备用;实验所用二水合氯化钙、三乙醇胺、二乙烯三胺五乙酸和盐酸为优级纯试剂,实验用水达到或者优于国家标准中二级水标准。

1.2 研究方法

1.2.1 方法原理

用 pH 等于 7.3, DTPA-CaCl₂-TEA 缓冲溶液作为提取剂,螯合浸提出土壤中的有效铜、铁、锰、锌、镉、钴、铅和镍。其中 DTPA 为螯合剂;CaCl₂ 能防止石灰性土壤中的游离钙的溶解,避免因碳酸钙所包底的锌铁等元素释放产生影响;TEA 作为缓冲剂,能使溶液 pH 值保持在 7.3 左右,对碳酸钙溶解液起到抑制作用^[14-15]。

1.2.2 DTPA 配制方法和样品预处理

DTPA 浸提液的配制:将 1.967 g DTPA(二乙烯三胺五乙酸)、14.92 g TEA(三乙醇胺)和 1.470 g 二水合氯化钙加去离子水搅拌使其完全溶解,继续加水稀释至约 950 mL,在 pH 计上用稀盐酸溶液调整 pH 值为 7.3,转移至 1 000 mL 容量瓶中定容,摇匀,避光保存。

准确称取 10.0 g(精确至 0.000 1 g)土壤样品,置于 100 mL 三角锥形瓶中,加入 20.0 mL DTPA 浸提液,盖紧瓶塞。在 25 ℃室温下,以 180 r/min

的振荡频率振荡 2 h。将浸提慢倒入离心管中,以 3 000 r/min 离心 10 min,上清液经中速定量滤纸重力过滤后于 48 h 内进行测定分析。

2 结果与分析

2.1 提取液的选择

一次化学试剂提取法提取的金属形态是指植物能吸收利用的所有形态,化学试剂提取方法提取的金属含量与植物的相关性较好,可用来评价土壤中重金属存在的情况和土壤质量情况。在现在使用的一次性化学试剂提取法中,主要有中性盐、金属螯合剂、酸试剂等。因浸提剂对土壤中的金属浸提机理不同,不同浸提剂对金属的浸提效率也有所差异。选用何种提取剂,要根据目的地的 pH 值、有机物含量等情况确定。在方法实验之前,已经对该目的地的 pH 和有机物含量进行大量检测,该地区有机物含量不高,pH 值在 7.5 左右,属于中性和偏碱性土壤,不适合用稀 HCl 提取,稀 HCl 缓冲性能弱,在碱性土壤和石灰性土壤中酸被碱中和,抑制了 H⁺ 的置换作用,它对 Cd、Cu、Zn、Pb 的提取率很小,不利于仪器检测。此外,有研究表明,DTPA 提取的金属离子除 Zn 外,其他金属离子和植物的金属离子高度相关^[16]。因此,实验选择 DTPA 为该地区 8 种元素的提取剂。

2.2 分析仪器参数的选择

ICP-OES 测定金属元素,谱线波长的选择和仪器参数的优化十分重要,是减少光谱干扰和非光谱干扰的有效手段。谱线的选择原则是选择灵敏度高,信噪比大^[17-18],待分析谱线周围“干净”没有和其他重复的谱线。通过该地区的盲样全谱分析,发现有效 Cd、Ni、Zn 含量都不高。为有效减少分析误差,通过条件优化实验,确定的分析谱线和仪器参数(功率、载气流速和雾化器压力)如表 1 所示。测定时以 Sr 为内标校正基体效应。

表 1 电感耦合等离子体发射光谱仪工作条件

Table 1 Working conditions of instrument

元素	波长/mm	RF 功率/W	雾化器压力/MPa	载气流速/(L·min ⁻¹)	冷却器流速/(L·min ⁻¹)	测定次数
铜	324.735	1 100	0.3	1.4	15	3
锌	213.856					
镉	214.418					
钴	228.616					
镍	231.604					
锰	257.610					
铅	220.355					
铁	259.940					

2.3 浸提条件的确定

DTPA 是非平衡体系,很多因素都可能影响浸提效果,DTPA 的酸度、浓度、水土比(浸提液的体积和土壤的质量之比),温度、振荡时间和浸提瓶等都会影响浸提效果^[19]。其中振荡时间和水土比是影响浸提效率的最关键因素。

2.3.1 振荡时间的确定

按照实验方法,在振荡时间 0.5~5 h 范围内,对标准物质和未知的土壤样品(富源地区)进行比对分析。一个样品平行称取多份,每相隔 30 min 对一个样品进行离心检测,标准物质 GBW07415a 中 8 种有效态结果见图 1 和图 2(未知样品和标准样品有相同的结果,以 GBW07415a 为例说明)。从图中可以看出,在 2 h 内,各元素有效态的值和时间是正相关,且先快后慢;当振荡时间在 2~3.5 h 内,各元素有效态的值变化不大,趋于平稳。当振荡时间在 3.5~5 h 时,各元素有效态的值有缓慢上升的趋势。刚开始时,提取剂和土壤混合时,土壤样品中的有效态随着时间不断从土壤中浸提出来,振荡时间在 2 h 左右,有效态可能完全浸提出来,但是当振荡时间增长,超过 3.5 h 后,有一部分非有效态也可能

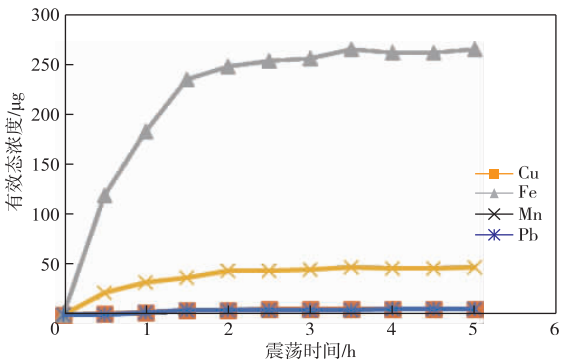


图 1 振荡时间对 Cu、Fe、Mn、Pb 的影响

Figure 1 Effect of oscillation time on Cu, Fe, Mn and Pb.

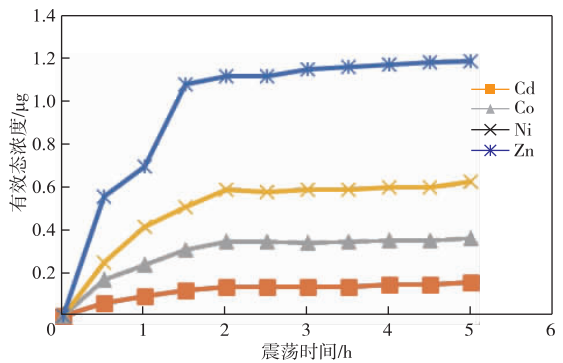


图 2 振荡时间对 Cd、Co、Ni、Zn 的影响

Figure 2 Effect of oscillation time on Cd, Co, Ni and Zn.

被浸提出来,此时提取的部分植物不能吸收,不能当作有效组分。因此,实验选择振荡时间为 2 h。

2.3.2 水土比的确定

按照实验方法,选用不同的水土比 1:1、2:1、3:1 对国家一级标准物资 GBW07415a 进行实验,测定结果见表 2,水土比 1:1 时,各元素的有效态测定值普遍偏低,可能浸提液少,不能完全螯合土壤中的有效态;当水土比为 2:1 时,测定值和标准值吻合;水土比为 3:1 时,测定值和标准值相比,测定值有高低,可能是测量误差,有效 Cd、Cu、Zn、Pb、Co、Ni 的值在土壤中含量不高,当水土比较大时,有效态含量接近检出限,测量误差较大。因此实验选择水土比 2:1。

表 2 不同水土比对各元素有效态值的影响
Table 2 Effects of different water-soil ratios on effective state values of various elements

/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)					
标准物质	元素	标准值	水土比 1:1	水土比 2:1	水土比 3:1
GBW07415a	Cd	0.137	0.11	0.135	0.142
	Co	0.34	0.31	0.35	0.33
	Cu	5.80	5.23	5.75	5.92
	Fe	252	220	248	263
	Mn	45.0	38	44	48
	Ni	0.58	0.45	0.59	0.42
	Pb	5.60	4.11	5.56	5.72
	Zn	1.14	0.87	1.12	1.21

2.4 方法检出限和测定限

按照样品分析全步骤,重复 10 次全程序空白实验,计算 10 次平行测定的标准偏差,按照计算公式(1)

计算方法检出限。检出限的 4 倍为测定下限。计算检出限和测定下限的结果见表 3。从表 3 中可以看出,测试的工作曲线线性相关系数均在 0.99 以上,工作曲线线性良好,满足分析测试要求。

$$MDL = t_{n-1, 0.99} \times S \quad (1)$$

式中:MDL—检出限, $\mu\text{g/g}$; n —样品平行测定次数; t —自由度为 $n-1$,置信度为 99% 时的 t 值; S — n 次测定的标准偏差。

表 3 各元素检出限和定量下限
Table 3 The detection limit and the lower limit of determination of each element

/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			
元素	相关系数	检出限	测定下限
Cd	1.00	0.001	0.004
Co	1.00	0.008	0.034
Cu	1.00	0.004	0.016
Fe	1.00	0.015	0.062
Mn	0.999	0.003	0.011
Ni	1.00	0.006	0.025
Pb	1.00	0.040	0.16
Zn	1.00	0.006	0.022

2.5 方法的准确度和精密度实验

将土壤标准物质 GBW07415a、GBW07416a、GBW07461 和按照最佳条件平行制成 6 份待测试液,测试 8 种元素的含量,并计算各元素的平均值、相对标准偏差。结果见表 4。各元素的测定值和标准值吻合,表明该方法准确度高。Cd、Co、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn 的相对标准偏差均小于 5%,说明本方法精密度高。

表 4 标准物质分析结果
Table 4 Analysis results of reference materials

/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)								
项目	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
GBW07415a	标准值	0.137	0.34	5.80	252	45.0	0.58	5.60
	测定平均值	0.135	0.35	5.75	248	44	0.59	5.56
	相对标准偏差	0.51	1.1	1.6	0.50	1.2	0.91	1.7
GBW07416a	标准值	0.016	0.083	0.24	23.0	5.70	0.072	1.50
	测定平均值	0.015	0.084	0.24	22.5	5.59	0.074	1.48
	相对标准偏差	3.4	2.2	2.6	0.82	0.40	4.4	1.8
GBW07461	标准值	0.049	0.073	2.6	76	21	0.26	3.8
	测定平均值	0.052	0.072	2.7	72	23	0.25	3.9
	相对标准偏差	3.6	2.2	2.9	3.4	2.4	3.3	2.6

2.6 方法加标回收实验

为进一步验证本方法的准确度,取云南富源项目的未知样品 6 件进行加标回收实验,每件样品平

行分析 3 次取平均值,结果见表 5。从结果能看出, Cd、Co、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn 这 8 种元素加标回收率在 90.0%~110%,符合分析要求。

表 5 加标回收实验

Table 5 Experimental results of standard addition and recovery

项目	元素	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
本底值/ μg	Cd	0.16	0.45	0.15	0.19	0.08	0.09
	Co	0.38	0.35	0.65	0.47	0.52	0.27
	Cu	9.12	12.20	5.10	6.42	6.04	4.36
	Fe	64	307	80	287	293	150
	Mn	23	30	61	59	120	57
	Ni	0.58	0.24	1.25	2.15	0.86	0.56
	Pb	2.30	4.30	5.95	2.80	8.20	4.13
	Zn	0.85	1.41	1.24	1.27	1.35	1.38
加标值/ μg	Cd	0.17	0.54	0.18	0.24	0.096	0.15
	Co	0.44	0.42	0.78	0.56	0.65	0.32
	Cu	10.4	14.6	6.12	7.65	7.6	5.3
	Fe	78	369	96	344	354	180
	Mn	28	36	74	71	140	68
	Ni	0.75	0.29	1.5	2.36	1.05	0.38
	Pb	2.86	5.16	7.14	3.45	9.7	5.1
	Zn	1.12	1.70	1.45	1.45	1.65	1.65
测得值/ μg	Cd	0.34	0.97	0.33	0.42	0.17	0.25
	Co	0.84	0.75	1.45	1.03	1.14	0.59
	Cu	20.1	28.00	11.30	14.12	13.28	9.59
	Fe	141	674	184	631	644	315
	Mn	50.6	65.2	138	128	264	124
	Ni	1.28	0.54	2.65	4.73	1.89	0.95
	Pb	5.06	9.50	12.60	6.16	18.04	9.14
	Zn	1.87	3.20	2.76	2.79	2.96	3.09
回收率/%	Cd	106	96.0	101	95.1	94.1	107
	Co	104	94.2	103	101	96.1	101
	Cu	105	108	101	101	95.2	99.1
	Fe	98.2	99.1	108	100	99.0	92.0
	Mn	99.1	98.1	104	97.2	103	98.2
	Ni	93.2	104	93.1	109	98.0	104
	Pb	97.1	101	93.3	97.2	101	98.1
	Zn	91.2	105	105	105	98.3	104

2.7 实际样品分析

为按照实验方法对云南富源-贵州盘州能源矿产集中区生态修复项目的 2 000 余件样品进行分析,安插在分析批次里面的国家一级标准物质合格率为 100%。按照验收要求对基本分析样品进行一定比例的盲样外检,相互对比一次合格率为 99%,说明本方法再现性好。

3 结论

结合云南富源某地区的土壤背景条件,采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取土壤中的 8 种有效态元素,用 ICP-OES 测定。通过优化仪器工作条件,降低了基体效应和光谱干扰。通过实验,确定了最佳的震荡时间和水土比,用国家一级标准物质进行验证,说明本方法检出限、准确度和精密度满足分析要求。通过对云南富源地区的土壤样品进行大量分析,该方法稳定性好,通过和外单位的数据对比,

该方法再现性好。总之,该方法操作快速简单,绿色环保,方法线性相关系数好,适合该地区土壤中有效态元素的分析,该方法对于分析土壤中有效态元素具有重要的现实意义。

参考文献

[1] 刘贵清. 循环经济的多维理论研究[D]. 青岛:青岛大学,2010.
LIU Guiqing. Multi-dimensional theoretical research on circular economy[D]. Qingdao:Qingdao University,2010.

[2] 王小玻. 重金属复合污染农田土壤植物修复的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
WANG Xiaobo. Study on phytoremediation of farmland soil polluted by heavy metals[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2010.

[3] 赵成义. 陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究[D]. 北京:中国农业科学院,2004.

- ZHAO Chengyi. Study on soil respiration and soil carbon cycle in different terrestrial ecosystems[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004.
- [4] 郁珊珊, 王浩, 王亚军. 南京市不同园林植物根际土壤养分和重金属富集特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 120-127.
- YU Shanshan, WANG Hao, WANG Yajun. Enrichment characteristics of nutrients and heavy metals in rhizosphere soil of different garden plants in Nanjing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 120-127.
- [5] 刘小娟. 太原污灌区土壤有效态及作物重金属含量分析[D]. 太原: 山西大学, 2010.
- LIU Xiaojuan. Analysis of soil available state and heavy metal content of crops in Taiyuan sewage irrigation area[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2010.
- [6] 王永民, 陈延. 宁夏农垦土地综合开发与利用技术研究[M]. 宁夏: 宁夏阳光出版社, 2011.
- WANG Yongmin, CHEN Yan. Research on comprehensive development and utilization technology of Ningxia agricultural reclamation land [M]. Ningxia: Ningxia Sunshine Publishing House, 2011.
- [7] FOOTE M. Rarefaction analysis of morphological and taxonomic diversity [J]. Paleobiology, 1992, 18(1): 1-16.
- [8] 乐淑葵, 段永梅. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤中的重金属元素[J]. 中国无机分析化学, 2015, 5(3): 16-19.
- LE Shukui, DUAN Yongmei. Determination of heavy metals in soil by ICP-MS [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2015, 5(3): 16-19.
- [9] 刘建军, 王玉功, 倪能, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定农产品土壤中铅、镉、铬消解方法的改进[J]. 中国无机分析化学, 2016, 6(1): 10-13.
- LIU Jianjun, WANG Yugong, NI Neng, et al. Improvement of digestion method for determination of lead, cadmium and chromium in soil of agricultural products by ICP-MS [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2016, 6(1): 10-13.
- [10] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 采用浸提法探讨土壤中外源铅的生物有效性[J]. 环境生态学, 2020, 2(9): 31-37.
- YANG Jinyan, YANG Xiaoe, HE Zhenli. Study on bioavailability of exogenous lead in soil by leaching method [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(9): 31-37.
- [11] 铁梅, 宋琳琳, 惠秀娟, 等. 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2173-2181.
- TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al. Available distribution and bioavailability of heavy metals in polluted soil[J]. Acta Ecology, 2013, 33(7): 2173-2181.
- [12] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 土壤中铅的来源及生物有效性[J]. 土壤通报, 2005(5): 127-134.
- YANG Jinyan, YANG Xiao'e, HE Zhenli. Sources and bioavailability of lead in soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005(5): 127-134.
- [13] NOEL J D, BISWAS P, GIAMMAR D E. Evaluation of a sequential extraction process used for determining mercury binding mechanisms to coal combustion byproducts[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(7): 856-867.
- [14] 孙鸣镝, 方海兰, 郝冠军, 等. AB-DTPA, CaCl₂-DTPA两种方法分析土壤8种元素的有效态含量[J]. 土壤与作物, 2014, 3(2): 50-55.
- SUN Mingdi, FANG Hailan, HAO Guanjuan, et al. Analysis of available contents of 8 elements in soil by AB-DTPA and CaCl₂-DTPA[J]. Soil and Crops, 2014, 3(2): 50-55.
- [15] LV T, DU H. Tracking system of soil trace elements differential migration path based on large data [J]. Ekoloji, 2019, 28(108): 2357-2361.
- [16] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008(2): 858-865.
- BAO Tong, LIAN Meihua, SUN Lina, et al. Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. Ecological Environment, 2008(2): 858-865.
- [17] 臧真娟, 周蕾玲. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定 RoHS 指令聚合物中的铅和镉[J]. 中国无机分析化学, 2018, 8(2): 14-16.
- ZANG Zhenjuan, ZHOU Leiling. Determination of lead and cadmium in RoHS instruction polymer by ICP-AES[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2018, 8(2): 14-16.
- [18] 余海军, 张莉莉, 屈志朋, 等. 微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法同时测定土壤中主次元素[J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(1): 34-38.
- YU Haijun, ZHANG Lili, QU Zhipeng, et al. Simultaneous determination of primary and secondary elements in soil by microwave digestion-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry(ICP-AES)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(1): 34-38.
- [19] 钱元宇, 刘克. 响应曲面法优化土壤镉浸提过程[J]. 环境工程学报, 2018, 12(12): 3448-3455.
- QIAN Yuanyu, LIU Ke. Optimization of cadmium extraction process in soil by response surface methodology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(12): 3448-3455.